

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**Metodologias Utilizadas no Estudo do Escoamento em Aquíferos
Cársticos e o Caso Prático da Captação do Olho de Mira
(Maciço Calcário Estremenho)**

Mestrado em Geologia Aplicada
Hidrogeologia

Ilda Oliveira Calçada

Dissertação orientada por:
Professor Doutor José António Crispim Aleixo Alves
Professor Doutor Carlos Alberto da Costa Almeida

Resumo

As regiões calcárias são, em geral, caracterizadas por aspetos particulares de relevo e circulação hídricas constituindo o denominado modelado cársico. Destaca-se a presença de depressões fechadas de dimensões e formas variáveis (dolinas, uvalas e poljes) e formas de absorção superficial (lapiás, algares, sumidouros) que dão origem a redes de drenagem subterrânea. A circulação superficial estruturada é substituída por uma circulação subterrânea bem desenvolvida que alimenta nascentes caudalosas. Pelo mundo fora, incluindo Portugal, os aquíferos cársicos têm sido encarados como uma das principais origens de água para abastecimento das populações e para o regadio. Analisando os dados disponíveis do INSAAR 2010, estima-se que 21% da água subterrânea distribuída em Portugal continental é proveniente de regiões carbonatadas.

A exploração dos recursos hídricos em aquíferos cársicos apresenta numerosos problemas devido, entre outros fatores, à pequena capacidade de regulação dos reservatórios cársicos, irregularidade do padrão de circulação subterrânea e elevada vulnerabilidade à poluição. A aplicação de metodologias adequadas ao estudo do escoamento em aquíferos cársicos pode resolver muitas destas dificuldades. No presente trabalho foi feita uma abordagem às várias metodologias, nomeadamente a investigação espeleológica (exploração e estudo das grutas), métodos geofísicos (métodos elétricos e eletromagnéticos), ensaios de traçagem com traçadores artificiais, hidrogramas, quimiogramas e ensaios de bombeamento. São mencionados vários trabalhos internacionais e nacionais, focando-se em especial as experiências de traçagem efetuadas nas regiões calcárias portuguesas.

Na captação do Olho de Mira (Mira de Aire, Maciço Calcário Estremenho) foi instalado um limnógrafo de tambor que monitorizou a evolução do nível de água. A interpretação dos dados registados conduziu a resultados relevantes: uma rápida recuperação do nível é observada na ocorrência de eventos pluviosos extremos; em ambiente de recarga difusa, com precipitação inferior a 15 mm, nunca se observou recuperação do nível; através da interpretação de ensaios de bombeamento estimou-se uma transmissividade de $760 \text{ m}^2/\text{dia}$ para a região do aquífero nas imediações do poço; parte da curva de recessão fornece coeficientes de esgotamento semelhantes aos da nascente do Alviela apresentados na bibliografia.

Palavras-chave: Aquíferos cársicos; Maciço Calcário Estremenho; Ensaios de bombeamento; Recarga; Curvas de recessão.

Abstract

Limestone regions are characterized by special landforms resulting from the dissolution of the rock by waters enriched in CO₂. Typical features present in this kind of landscape, known as Karst, are: closed depressions with different dimensions (dolines or poljes), karren, swallow holes and caves. A structured surface circulation is replaced by a high developed underground flow leading to large discharge springs. Around the world, karst aquifers are seen as a major source of water supply for the population and for irrigation and Portugal is no exception. Analyzing the data available from INSAAR 2010, it is estimated that 21% of groundwater distributed in the Portugal mainland comes from carbonate regions.

It is well known that the exploitation of water resources in karst aquifers is not straightforward. Some contributing factors are the small regulation capacity of karst reservoirs, uncertainty in predicting underground circulation and high vulnerability to pollution. The application of appropriate methodologies may help to understand the circulation in karst aquifers. A review of the various methodologies was made in this study, in particular the speleological research (exploration and cave study), geophysical methods (electrical and electromagnetic methods), tracing tests with artificial tracers, hydrographs, chemographs and pumping tests analysis. Several international and national studies are cited. Special emphasis was given to tracing tests conducted in Portuguese limestone regions.

The evolution of the water level in the Olho Mira well (Mira de Aire, Maciço Calcário Estremenho) was monitored between December of 1991 and October of 1992. The interpretation of the data has lead to relevant results that will help to guide future work: a quick level recovery is observed in extreme recharge situations; from the analysis of pumping tests it was estimated a transmissivity of 760 m²/day for the aquifer in the vicinity of the well; the analysis of some segments of the recession curve provides recession coefficients identical to those of Alviela spring presented in the literature.

Keywords: Karst Aquifers; Maciço Calcário Estremenho; Pumping Tests; Recharge; Recession Curve.

*À minha mãe Carmela
E restante família*

Agradecimentos

O presente trabalho não teria sido possível sem o apoio de algumas pessoas a quem quero expressar os meus mais sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar agradeço aos meus orientadores Professor Doutor José António Crispim e Professor Doutor Carlos Costa Almeida a sua disponibilidade, interesse e incentivo que sempre demonstraram ao longo de todo o percurso. O agradecimento duplo ao Professor Doutor José António Crispim pela cedência dos dados da componente prática, recolhidos com o auxílio da Câmara Municipal de Porto de Mós aquando a sua tese de doutoramento.

Aos meus colegas e amigos da Sociedade Portuguesa de Espeleologia pelo ânimo e interesse sempre demonstrados nesta caminhada. Ao Henrique Rézio, Vítor Leal, Luís Miguel Lopes, Cristina Lopes, António Sobreira, Pedro Marote, Alexandre Freitas, Eduardo Paralta, entre outros, pela camaradagem e partilha das aventuras espeleológicas.

Um obrigado a todos os monitores que participaram nas atividades da Geologia no Verão da Sociedade Portuguesa de Espeleologia, pelo seu interesse e perguntas pertinentes sobre as nossas regiões calcárias. À Sofia Pereira, Pedro Mocho, Inês Pereira, Alexandre Galocha, Filipe Alberto, Nuno Vieira, Sandra Amaro, Ricardo Tomás, Vili Grigorova e Joana Duarte pelas muitas discussões construtivas e proveitosas, essenciais no sulcar desta caminhada.

À Sofia Churro, Marisa Inácio, Pedro Santos, Nuno Inês, Helena Guimarães, Andreia Areias, Raquel Martins, entre outros, pela inestimável amizade e por terem sido um porto de abrigo quando nada fazia sentido! Ao Fernando Oliveira, meu amigo e companheiro na vida e na espeleologia.

E por último, mas que são sempre os primeiros, um obrigado à minha família pelo apoio e presença em mais uma etapa.

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. IMPORTÂNCIA DOS AQUÍFEROS CÁRSICOS	1
1.2. O PROBLEMA DA CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO NOS AQUÍFEROS CÁRSICOS	2
1.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO RELEVO	2
1.2.2. PARTICULARIDADES DOS AQUÍFEROS CÁRSICOS: RECARGA E INFILTRAÇÃO, ARMAZENAMENTO E DESCARGA	3
1.2.3. MOTIVAÇÃO, OBJETIVO E ORGANIZAÇÃO DO PRESENTE TRABALHO	4
1.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	6
CAPÍTULO 2. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS, AQUÍFEROS CARBONATADOS E ABASTECIMENTO PÚBLICO	9
2.1. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	9
2.1.1. MACIÇO ANTIGO	11
2.1.2. ORLA OCIDENTAL	13
2.1.3. ORLA MERIDIONAL	15
2.2. ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM PORTUGAL CONTINENTAL	16
2.2.1. AS CAPTAÇÕES REGISTADAS NO INSAAR 2010	19
2.2.2. MACIÇO ANTIGO	20
2.2.3. ORLA OCIDENTAL	21
2.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	23
2.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
CAPÍTULO 3. INVESTIGAÇÃO ESPELEOLÓGICA	27
3.1. A EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONHECIMENTO ESPELEOLÓGICO E A SUA CONTRIBUIÇÃO NOS ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS	27
3.1.1. NO MUNDO	27
3.1.2. EM PORTUGAL	31
3.2. A IMPORTÂNCIA DAS GRUTAS PARA O ESTUDO DO ESCOAMENTO	32
3.2.1. EXPLORAÇÃO E TOPOGRAFIA	33
3.2.2. IMPLANTAÇÃO DE UM FURO NUMA GALERIA FREÁTICA	34
3.2.3. GÊNESE E EVOLUÇÃO DAS REDES DE GALERIAS	35
3.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
CAPÍTULO 4. MÉTODOS GEOFÍSICOS	41

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	41
4.1.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA (RE)	42
4.1.2. RADAR PENETRAÇÃO NO SOLO (GROUND PENETRATING RADAR - GPR) OU GEO-RADAR	44
4.1.3. SISTEMAS DE TRANSMISSÃO REMOTA	47
4.1.4. MÉTODO ELETROMAGNÉTICO TRANSIENTE – TEM	50
4.2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

<u>CAPÍTULO 5. TESTES DE TRAÇAGENS COM TRAÇADORES ARTIFICIAIS</u>	57
--	-----------

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	57
5.2. TESTES DE TRAÇAGENS COM TRAÇADORES FLUORESCENTES	58
5.2.1. TRAÇADORES FLUORESCENTES	58
5.2.2. QUANTIDADE A INJETAR	59
5.2.3. INJEÇÃO E AMOSTRAGEM	60
5.2.4. ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA	61
5.3. TESTES DE TRAÇAGENS COM TRAÇADORES EM PARTÍCULAS OU TRAÇADORES BIOLÓGICOS	62
5.3.1. BACTERÍOFAGOS	63
5.3.2. SELEÇÃO DO SISTEMA BACTERÍFAGO/BACTÉRIA HOSPEDEIRA (BBH) E PREPARAÇÃO DA SUSPENSÃO DE FAGOS	64
5.3.3. DETECÇÃO E ENUMERAÇÃO DOS BACTERÍOFAGOS	65
5.4. AVALIAÇÃO E INTERPRETAÇÃO	65
5.4.1. QUALIDADE DOS DADOS, ANÁLISE DE ERROS E FUNDO	65
5.4.2. CURVA DE RESTITUIÇÃO, TEMPO DE TRÂNSITO E VELOCIDADE	66
5.4.3. CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE GALERIAS	67
5.5. TESTES DE TRAÇAGENS EM PORTUGAL, COM TRAÇADORES ARTIFICIAIS	68
5.5.1. TESTES EM PORTUGAL COM TRAÇADORES FLUORESCENTES	68
5.5.2. TESTES EM PORTUGAL COM TRAÇADORES POR PARTÍCULAS OU BIOLÓGICOS	74
5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
5.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

<u>CAPÍTULO 6. METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DO ESCOAMENTO NOS AQUIFEROS CÁRSICOS</u>	79
--	-----------

6.1. HIDROGRAMA DE NASCENTE	79
6.1.1. ANÁLISE DA CURVA DE RECESSÃO DO HIDROGRAMA DE NASCENTE	81
6.2. INTERPRETAÇÃO DE QUIMIOGRAMAS DE NASCENTE	84
6.3. ENSAIOS DE BOMBEAMENTO	87
6.3.1. PARTICULARIDADES DA INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS DE BOMBEAMENTO DE FUROS EM MEIOS CÁRSICOS	88

<u>CAPÍTULO 7. CASO PRÁTICO: A CAPTAÇÃO DO OLHO DE MIRA (MACIÇO CALCÁRIO ESTREMENHO)</u>	
---	--

7.1. MACIÇO CALCÁRIO ESTREMENHO	95
7.2. ENQUADRAMENTO HIDROGEOLÓGICO	97
7.3. CAPTAÇÃO DO OLHO DE MIRA	99
7.3.1. BACIA DE ALIMENTAÇÃO DO POÇO E NASCENTE DO OLHO DE MIRA	101
7.3.2. EXPLORAÇÕES ESPELEOLÓGICAS, OPERAÇÕES DE TRAÇAGENS E QUIMIOGRAMA DO OLHO DE MIRA	105
7.3.3. ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA DA CAPTAÇÃO DO OLHO DE MIRA	106
7.4. LIMNIGRAMA DO POÇO DA CAPTAÇÃO DO OLHO DE MIRA	107
7.4.1. AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS	108
7.4.2. INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NO NÍVEL DE ÁGUA DO POÇO DA CAPTAÇÃO OLHO DE MIRA	110
7.4.3. INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS DE BOMBEAMENTO	114
7.4.4. INTERPRETAÇÃO DA CURVA DE RECESSÃO DO POÇO DA CAPTAÇÃO DO OLHO DE MIRA, ANO HIDROLÓGICO 1991/1992	120
7.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	126
7.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
 ANEXOS	 131
 ANEXO 1 – SISTEMAS AQUÍFEROS COM ESCOAMENTO CÁRSICO	 133
 ANEXO 2 – CAPTAÇÕES PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO INSERIDAS EM REGIÕES CARBONATADAS (INSAAR 2010)	 137
 ANEXO 3 – PARÂMETROS DESCONFORMES AO DECRETO-LEI 306/2007 DE 27 DE AGOSTO EM ÁGUAS COLHIDAS NA CAPTAÇÃO OLHO DE MIRA (318/C83)	 141
 ANEXO 4 - PRECIPITAÇÃO DIÁRIA DAS ESTAÇÕES UDOMÉTRICAS NAS IMEDIAÇÕES DA BACIA DE ALIMENTAÇÃO DAS NASCENTE DO OLHO DE MIRA	 143
 ANEXO 5 – ENSAIOS DE BOMBEAMENTO	 151

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1 - Introdução

FIGURA 1.1 - DIAGRAMA ILUSTRATIVO DOS PRINCIPAIS FENÓMENOS QUE OCORREM NOS TERRENOS CÁRSICOS. (IN: FORD & WILLIAMS, 1989).	2
FIGURA 1.2 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DA HETEROGENEIDADE DE UM AQUIFERO CÁRSICO CARACTERIZADO PELOS DIFERENTES TIPOS DE RECARGA (AUTOGÉNICA E ALOGÉNICA), TIPO DE INFILTRAÇÃO (CONCENTRADA E DIFUSA) E AS FORMAS DE ESCOAMENTO (ATRAVÉS DE GALERIAS OU NA MATRIZ) (IN: GOLDSCHIEDER ET AL., 2007).	4

Capítulo 2 - Unidades Hidrogeológicas, Aquíferos Carbonatados e Abastecimento Público

FIGURA 2.1 - PRINCIPAIS REGIÕES CÁRSICAS DE PORTUGAL (IN: CRISPIM, 2010B)	10
FIGURA 2.2 - LOCALIZAÇÃO DO CONJUNTO DOS SISTEMAS AQUIFEROS DO MACIÇO ANTIGO (LADO ESQUERDO) E APENAS OS QUE TÊM COMPORTAMENTO CÁRSICO (LADO DIREITO) (ADAPTADO DE ALMEIDA ET AL., 2000).	12
FIGURA 2.3 - LOCALIZAÇÃO DO CONJUNTO DOS SISTEMAS AQUIFEROS DA ORLA OCIDENTAL (LADO ESQUERDO) E APENAS OS QUE TÊM COMPORTAMENTO CÁRSICO (LADO DIREITO) (ADAPTADO DE ALMEIDA ET AL., 2000).	14
FIGURA 2.4 - LOCALIZAÇÃO DO CONJUNTO DOS SISTEMAS AQUIFEROS DA ORLA MERIDIONAL (EM CIMA) E APENAS OS QUE TÊM COMPORTAMENTO CÁRSICO (EM BAIXO) (ADAPTADO DE ALMEIDA ET AL., 2000).	16
FIGURA 2.5 - LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS CAPTAÇÕES DE ÁGUA SUBTERRÂNEA QUE SE LOCALIZAM EM SISTEMAS AQUIFEROS COM COMPORTAMENTO CÁRSICO.	18
FIGURA 2.6 - NÚMERO DE CAPTAÇÕES E VOLUME CAPTADO POR TIPO DE COMPORTAMENTO DO AQUIFERO.....	19
FIGURA 2.7 - DISTRIBUIÇÃO DA PERCENTAGEM DE POPULAÇÃO SERVIDA PELOS DIFERENTES SISTEMAS AQUIFEROS CARBONATADOS DO MACIÇO ANTIGO.....	21
FIGURA 2.8 - NÚMERO DE CAPTAÇÕES E VOLUME CAPTADO PELOS SISTEMAS AQUIFEROS CARBONATADOS DO MACIÇO ANTIGO.....	21
FIGURA 2.9 - DISTRIBUIÇÃO DA PERCENTAGEM DE POPULAÇÃO SERVIDA PELOS DIFERENTES SISTEMAS AQUIFEROS CARBONATADOS DA ORLA OCIDENTAL.	22
FIGURA 2.10 - NÚMERO DE CAPTAÇÕES E VOLUME CAPTADO PELOS SISTEMAS AQUIFEROS CARBONATADOS DA ORLA OCIDENTAL. ..	23

Capítulo 3 - Investigação Espeleológica

FIGURA 3.1 - (A) SISTEMA DE CIRCULAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA DE ACORDO COM GRUND (1903), NA QUAL A ÁGUA SE ENCONTRA ESTAGNADA ABAIXO DO NÍVEL DAS ÁGUAS DO MAR. (B) SISTEMA DE CIRCULAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA DE ACORDO COM KATZER (1909), NA QUAL A ÁGUA CIRCULA ESSENCIALMENTE POR RIOS SUBTERRÂNEOS E INDEPENDENTES ENTRE SI.....	28
FIGURA 3.2 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA GÉNESE DE GRUTAS: A – TEORIA DA ESPELEOGÉNESE VADOSA (VADOSE THEORY: DWERRYHOUSE, 1907; MARTEL, 1921); B – TEORIA DA ESPELEOGÉNESE FREÁTICA PROFUNDA (DEEP PHREATIC THEORY: DAVIS, 1930, 1931; BRETZ, 1942); C – TEORIA DA ESPELEOGÉNESE NA SUPERFÍCIE FREÁTICA (WATERTABLE CAVE THEORY: SWINNERTON, 1932; RHOADES & SINACORI, 1941). (IN: FORD, 1999).....	29
FIGURA 3.3 - MODELO DOS “QUATRO ESTADOS” SOBRE O PERFIL DE UMA GRUTA FREÁTICA. (IN: FORD, 1971).	30
FIGURA 3.4 - NA FIGURA DA ESQUERDA PODE-SE OBSERVAR O SISTEMA SIEBENHENGSTE-HOHGANT (SUIÇA) EM 3D E À DIREITA UMA AMPLIAÇÃO DA MESMA GRUTA (IN: HELLER & NEUMANN, 2001).	33

FIGURA 3.5 - EXEMPLO DE UM CONJUNTO DE ESTALAGMITES REAIS E A SUA VISUALIZAÇÃO UTILIZANDO 3D SCANNERS A LASER. (IN: SILVESTRE ET AL., 2015)	34
---	----

Capítulo 4 - Métodos Geofísicos

FIGURA 4.1 - CONFIGURAÇÕES DE ELÉTODOS: DIPOLO-DIPOLO E POLO-DIPOLO (ADAPTAÇÃO DE MORRISON & GASPERIKOVA, 2015), EM QUE N.A=SEPARAÇÃO DE DIPOLOS, A=COMPRIMENTO DO DIPOLO.....	43
FIGURA 4.2 - EM CIMA O CORTE E EM BAIXO A PLANTA COM A LOCALIZAÇÃO DO PERFIL N-S NA PLANTA DO ALGAR DA CORUJAS, NO MACIÇO CALCÁRIO ESTREMENHO. (IN: AFONSO & SANTOS, 1988).....	43
FIGURA 4.3 - PERFIL DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO ALGAR DAS CORUJAS (MACIÇO CALCÁRIO ESTREMENHO), APLICANDO A CONFIGURAÇÃO DE ELÉTODOS POLO-DIPOLO. ENTRE OS PONTOS 10 E 13 E À PROFUNDIDADE DE 3,5 E 7 METROS OBSERVA-SE A SALA CONHECIDA DA GRUTA QUE O PERFIL INTERSETA. (IN: SANTOS & AFONSO, 2005).....	44
FIGURA 4.4 - PRINCÍPIO DO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR). (IN: REYNOLDS, 1997)	45
FIGURA 4.5 - INTERPRETAÇÃO DO RADARGRAMA: A – CALCÁRIO FRATURADO DO EPICARSO; B – CALCÁRIO COMPACTO; C – GRUTA DE LAMALOU; D – POÇO NO INTERIOR DA GRUTA; F – FALHA; L – LAPIÁS; P1, P2, P3 – PLANOS DE ESTRATIFICAÇÃO; X – GRUTA DESCONHECIDA.	46
FIGURA 4.6 - PRINCÍPIO DO MÉTODO VLF-EM SEGUNDO TURBERG & MÜLLER (1992). (IN: CARVALHO DILL ET AL., 1998)	47
FIGURA 4.7 - MÉTODO RADIOFREQUENCY-ELECTROMAGNETIC (RF-EM): EQUIPAMENTO MANUAL E JIPE COM ANTENA INCORPORADA. O GRÁFICO REPRESENTA O SINAL OBTIDO DE UMA FALHA GEOLÓGICA. (IN: CARVALHO DILL ET AL, 2009).	48
FIGURA 4.8 - LOCALIZAÇÃO DE ESTAÇÕES EMISSORAS DA FREQUÊNCIA 30-300 KHz, NA EUROPA. (IN: OSKOOI, 2004).	48
FIGURA 4.9 - CONFIGURAÇÃO DA METODOLOGIA RMT-R. AS FREQUÊNCIAS MAIS BAIXAS ENCONTRAM-SE ASSOCIADAS A MAIORES PROFUNDIDADES DE PENETRAÇÃO. (IN: NEWMAN ET AL., 2003).	49
FIGURA 4.10 - DUAS SECÇÕES DE RESISTIVIDADE EFETUADAS NUM DEPÓSITO: SECÇÃO 1 REPRESENTA UMA MOREIA E A SECÇÃO 2 REPRESENTA UM CAOS DE BLOCOS. (IN: TULLEN ET AL., 2006).	50
FIGURA 4.11 - COMPORTAMENTO DOS VÁRIOS ELEMENTOS DO PROCESSO TRANSIENTE. (A) VARIAÇÃO DA CORRENTE NO	51
FIGURA 4.12 - SECÇÃO GEOELÉTRICA, UTILIZANDO O SISTEMA TEM-FAST 48, INFERINDO OS PLANOS DA FALHA DE QUIALHOS (SERRA DA BOA VIAGEM). (IN: MACHADINHO ET AL., 2010).	52

Capítulo 5 - Testes de Traçagens com Traçadores Artificiais

FIGURA 5.1 - CÉLULA ÓTICA (TUBO DE VIDRO) E QUATRO CANAIS ÓTICOS E FOTODETETORES (IN: SCHNEGG, 2002)	62
FIGURA 5.2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA REPRODUÇÃO DE UM BACTERÍOFAGO ATRAVÉS DE UM CICLO LÍTICO	64
FIGURA 5.3 - EXEMPLO DE UMA CURVA DE RESTITUIÇÃO RESULTANTE DA INJEÇÃO INSTANTÂNEA. AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SÃO: TEMPO DA PRIMEIRA DETECÇÃO (T_1), TEMPO E CONCENTRAÇÃO DO PICO (T_p , C_p), TEMPO DE CONCENTRAÇÃO DO CENTRÓIDE CC (T_c), TEMPO ONDE METADE DO TRAÇADOR RECUPERADO JÁ PASSOU (T_{50}), FIM DO PERÍODO DE OBSERVAÇÃO (T_e). A CURVA DE RECUPERAÇÃO MOSTRA CUMULATIVAMENTE A FRAÇÃO DE TRAÇADOR INJETADO QUE CHEGOU. NESTE CASO, O TOTAL RECUPERADO NO FINAL DO TEMPO DE OBSERVAÇÃO FOI DE 72%, ENTÃO O T_{50} É O TEMPO COM 36% DE RECUPERAÇÃO (ADAPTADO BENISCHKE ET AL., 2007).	66

Capítulo 6 - Metodologias para Análise do Escoamento nos Aquíferos Cársicos

FIGURA 6.1 - FORMA ESQUEMÁTICA DE UM HIDROGRAMA DE NASCENTE. OS PONTOS BRANCOS CORRESPONDEM À INFILTRAÇÃO MÁXIMA E AO FIM DA INFILTRAÇÃO. O TRIÂNGULO COM VÉRTICE VIRADO PARA BAIXO REPRESENTA A PRECIPITAÇÃO. (IN: KOVÁCS ET AL., 2005).....	79
FIGURA 6.2 - HIDROGRAMAS DE NASCENTES CÁRSICAS (IN: DUROZOY & PALOC, 1973; WILLIAMS, 1977; SMART, 1983; CRISPIM, 1995)	80
FIGURA 6.3 - HIDROGRAMA DE NASCENTE CONCEPTUAL EM QUE SE PODE OBSERVA AS PENDENTES DOMINANTES EM CADA REGIME DE ESCOAMENTO (GALERIAS, FRATURAS E MATRIZ) PROVOCANDO UMA RESPOSTA HIDRÁULICA DIFERENTE. (IN: TAYLOR & GREENE, 2008)	82
FIGURA 6.4 - CURVA DE RECESSÃO DE UMA NASCENTE CÁRSICA INTERPRETADA DE ACORDO COM A METODOLOGIA DE MANGIN (1975, 1998). A ÁREA CINZA REPRESENTA O ESCOAMENTO DE BASE E A ÁREA NÃO CINZENTA A ÁGUA DA RECARGA.....	83
FIGURA 6.5 - PLUVIOSIDADE E VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MAGNÉSIO EM DUAS NASCENTES CÁRSICAS: A – AS ÁGUAS QUE EMERGEM NA NASCENTE NÃO REFLETEM OS EVENTOS DE PLUVIOSIDADE POIS A CONCENTRAÇÃO DE MG MANTÉM-SE CONSTANTE; B – REFLETE DE FORMA NÍTIDA OS EVENTOS DE PLUVIOSIDADE ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MG DAS ÁGUAS QUE EMERGEM NA NASCENTE. (IN: HUNKELER & MUDRY, 2007).....	84
FIGURA 6.6 - EFEITOS DE PISTÃO NO ANO HIDROLÓGICO DE 1991, NA NASCENTE DOS OLHOS DE ÁGUA DO ALVIELA. (IN: CRISPIM, 1995).	85
FIGURA 6.7 - SEPARAÇÃO DAS COMPONENTES DO HIDROGRAMA DA RECESSÃO DE 1991, NA NASCENTE DOS OLHOS DE ÁGUA DO ALVIELA: Q – CAUDAL DAS NASCENTES; QM – CAUDAL ATRIBUÍDO À MATRIZ; QES – CAUDAL ATRIBUÍDO AO ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO. (IN: CRISPIM, 1995).....	87
FIGURA 6.8 - DADOS DE TEMPO/REBAIXAMENTO DO AQUIFERO SUPERIOR DA FLORIDA OBTIDOS NO PIEZÓMETRO F1, UTILIZANDO AS EQUAÇÕES DE THEIS (1935) E COOPER & JACOB (1946). (IN: KREVIC, 2007).	89
FIGURA 6.9 - RESPOSTA TEÓRICA DA CURVA TEMPO-REBAIXAMENTO AO EFEITO CAUSADO PELA DUPLA POROSIDADE PRESENTE NOS AQUIFEROS CÁRSICOS. (1) REBAIXAMENTO PROVOCADO PELO ESCOAMENTO DA POROSIDADE SECUNDÁRIA (FRATURAS E CONDUTAS). (2) REBAIXAMENTO DE TRANSIÇÃO. (3) REBAIXAMENTO PROVOCADO PELO ESTABILIZAR DO ESCOAMENTO DE TODOS OS TIPOS DE POROSIDADE PRESENTE NO AQUIFERO, INCLUINDO A POROSIDADE DA MATRIZ. (IN: KRESIC, 2007).....	89

Capítulo 7 - Caso Prático: A Captação do Olho de Mira (Maciço Calcário Estremenho)

FIGURA 7.1 - INUNDAÇÃO PERIÓDICA DO POLJE DE MINDE EM FEVEREIRO 2014. EM ÚLTIMO PLANO OBSERVA-SE A VERTENTE SUDOESTE DO PLANALTO DE S. MAMEDE E A POVOAÇÃO DE MIRA DE AIRE.....	96
FIGURA 7.2 - ENQUADRAMENTO LITOESTRATIGRÁFICO DO SISTEMA AQUIFERO DO MACIÇO CALCÁRIO ESTREMENHO (IN: ALMEIDA ET AL., 2000).....	98
FIGURA 7.3 - RIO DO OLHO EM FUNCIONAMENTO À SAÍDA DA NASCENTE DO OLHO DE MIRA (FOTOGRAFIA DE DEZEMBRO DE 2010).	99
FIGURA 7.4 - VESTÍGIOS DAS INTERVENÇÕES EFETUADAS NA GALERIA DA GRUTA DO OLHO DE MIRA ANTES DA CONSTRUÇÃO DA CAPTAÇÃO ATUAL (FOTOGRAFIAS DE JULHO 2010).	100
FIGURA 7.5 - ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO DA CAPTAÇÃO DO OLHO DE MIRA E ESTAÇÃO ELEVATÓRIA, NO MUNICÍPIO DE PORTO DE MÓS (IMAGEM DE SATÉLITE EXTRAÍDA DE ARCGIS 10 - ARCGISONLINE, DEZEMBRO, 2010).....	101
FIGURA 7.6 - BACIAS E SUB-BACIAS NO SISTEMA AQUIFERO DO MACIÇO CALCÁRIO ESTREMENHO: 1 - LIS; 2 - REIXIDA; 3 - FONTE DOS MARCOS; 4 - RIO SECO; 5 - ALCAIDE; 6 - FÓRNEA; 7 - LENA; 8 - CHIQUEDA; 9 - ALMONDA; 10 - ALVIELA; 11 - VILA MOREIRA; 12 - ALCOBERTAS; 13 - BOCAS DO RIO MAIOR (IN CRISPIM, 2010). TRACEJADO VERMELHO INDICA LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO OLHO DE MIRA.	102

FIGURA 7.7 - DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGEOLÓGICA DA NASCENTE DO OLHO DE MIRA, IMPLANTADA SOBRE A CARTA MILITAR DE PORTUGAL, FOLHAS 308 – PORTO DE MÓS E 318 – MIRA DE AIRE.....	103
FIGURA 7.8 - DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGEOLÓGICA DA NASCENTE DO OLHO DE MIRA, IMPLANTADA SOBRE A CARTA GEOLÓGICA DE PORTUGAL, FOLHA 27A - VILA NOVA DE OURÉM (MANUPPELLA ET AL., 2000).	104
FIGURA 7.9 - CORTE ESQUEMÁTICO ENTRE A DEPRESSÃO DO MINDINHO E O POLJE DE MINDE COM A REPRESENTAÇÃO DAS GRUTAS DO MINDINHO E DO OLHO DE MIRA (IN: LOPES ET AL., 2007).	105
FIGURA 7.10 - SÍNTESE DA VARIAÇÃO QUÍMICA DAS ÁGUAS NO OLHO DE MIRA, DURANTE O PICO DE CHEIA DE 26 A 30 DE NOVEMBRO DE 1991. A: GALERIAS DA Z. SATURADA (EFEITO DE PISTÃO) + ZONA VADOSA; B: ZONA VADOSA; C: EPICARSO + ÁGUA SUPERFICIAL; D: ZONA SATURADA + ÁGUA SUPERFICIAL; E: ZONA SATURADA PREDOMINANTE. (IN: CRISPIM, 1995).....	106
FIGURA 7.11 - FOLHA DE REGISTO DO POÇO DA CAPTAÇÃO DO OLHO DE MIRA ENTRE O PERÍODO 23-01-1992 A 12-02-1992. .	108
FIGURA 7.12 - LIMNIGRAMA RESULTANTE DA FOLHA DE REGISTO DA FIGURA 7.11.	109
FIGURA 7.13 - EVOLUÇÃO DO NÍVEL DE ÁGUA NO POÇO DA CAPTAÇÃO DO OLHO DE MIRA AO LONGO DE 303 DIAS (6 DEZEMBRO DE 1991 A 4 DE OUTUBRO DE 1992).	110
FIGURA 7.14 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES UDOMÉTRICAS MAIS PRÓXIMAS DA BACIA DE ALIMENTAÇÃO DA NASCENTE DO OLHO DE MIRA.	111
FIGURA 7.15 - LIMNIGRAMA DO POÇO DA CAPTAÇÃO DO OLHO DE MIRA E MÉDIA DAS PRECIPITAÇÕES DAS ESTAÇÕES UDOMÉTRICAS DE CRESPOS, MINDE E SERRA DE SANTO ANTÓNIO, ENTRE 06 DEZEMBRO DE 1991 E 4 OUTUBRO DE 1992.	111
FIGURA 7.16 - PORMENOR DA INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NO HIDROGRAMA DO POÇO OLHO DE MIRA NOS PRIMEIROS 100 DIAS DE REGISTO.	112
FIGURA 7.17 - INFLUÊNCIA DAS PRECIPITAÇÕES OCORRIDAS ENTRE MARÇO E ABRIL DE 1992 NO NÍVEL DE ÁGUA DO POÇO DA CAPTAÇÃO DO OLHO DE MIRA PROVOCANDO O MAIOR PICO DE CHEIA REGISTRADO.	113
FIGURA 7.18 - VARIAÇÃO DO NÍVEL DE ÁGUA NO POÇO DA CAPTAÇÃO DO OLHO DE MIRA CONSOANTE O CAUDAL EM EXTRAÇÃO. .	115
FIGURA 7.19 - INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DE 10AGO1992, ONDE T É A TRANSMISSIVIDADE EM m^2/min : A – APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE PAPADOPULOS & COOPER (1967); B - APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE THEIS (1935); C – APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE COOPER & JACOB (1946).	117
FIGURA 7.20 - INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DE 05AGO1992, ONDE T É A TRANSMISSIVIDADE EM m^2/min : A – APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE PAPADOPULOS & COOPER (1967); B - APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE THEIS (1935).	118
FIGURA 7.21 - INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DE 05AGO1992, ONDE T É A TRANSMISSIVIDADE EM m^2/min , APLICANDO A EQUAÇÃO DE COOPER & JACOB (1946): A – AJUSTE DA RETA AO CONJUNTO DE DADOS MAIS INICIAIS; B – AJUSTE DA RETA TEÓRICA AO CONJUNTO DE DADOS MAIS TARDIOS.	118
FIGURA 7.22 - EXEMPLO DA CORREÇÃO DO NÍVEL DE ÁGUA COM OS SUCESSIVOS BOMBEAMENTOS (LINHA A AZUL) E NÍVEL DE ÁGUA CORRIGIDO (LINHA A VERMELHO).....	120
FIGURA 7.23 - AJUSTE DE EXPRESSÕES EXPONENCIAIS AO CONJUNTO DOS DADOS QUE CONSTITUEM A CURVA DE RECESSÃO DO HIDROGRAMA DO POÇO DA CAPTAÇÃO OLHO DE MIRA, ENTRE ABRIL E OUTUBRO DE 1992 (CERCA DE 180 DIAS).	121
FIGURA 7.24 - AJUSTE DE EXPRESSÕES EXPONENCIAIS À CURVA DE RECESSÃO DO HIDROGRAMA DO POÇO OLHO DE MIRA COM UMA DURAÇÃO DE 80 DIAS.	122
FIGURA 7.25 - O LOGARITMO NATURAL DA COLUMNA DE ÁGUA VERSUS O TEMPO EM HORAS, DURANTE A ÚLTIMA CURVA DE RECESSÃO DO HIDROGRAMA DO POÇO DA CAPTAÇÃO DO OLHO DE MIRA EM QUE H_x CORRESPONDE AO NÍVEL DE ÁGUA NO POÇO, Q_x AO CAUDAL TEÓRICO E λ_x AO DECLIVE DA RETA.	124

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 2 - Unidades Hidrogeológicas, Aquíferos Carbonatados e Abastecimento Público

TABELA 2.1 - NÚMERO DE CAPTAÇÕES POR TIPO DE AQUÍFERO.	17
TABELA 2.2 - VOLUME DE ÁGUA CAPTADO, POR TIPO DE COMPORTAMENTO DO AQUÍFERO.	18
TABELA 2.3 - N.º DE CAPTAÇÕES, POPULAÇÃO SERVIDA E VOLUME ANUAL CAPTADO.	20
TABELA 2.4 - DISTRIBUIÇÃO DO N.º DE CAPTAÇÕES, POPULAÇÃO SERVIDA E VOLUME ANUAL CAPTADO DO MACIÇO ANTIGO PELOS SEUS SISTEMAS AQUÍFEROS.	20
TABELA 2.5 - DISTRIBUIÇÃO DO N.º DE CAPTAÇÕES, POPULAÇÃO SERVIDA E VOLUME ANUAL CAPTADO NA ORLA OCIDENTAL NOS SISTEMAS AQUÍFEROS CÁRSICOS	22

Capítulo 4 - Métodos Geofísicos

TABELA 4.1 - QUADRO COMPARATIVO ENTRE AS QUATRO PRINCIPAIS GEOMETRIAS DE ELÉTODOS (ADAPTADO DE REYNOLDS, 1997).	42
--	----

Capítulo 5 - Testes de Traçagens com Traçadores Artificiais

TABELA 5.1 - PROPRIEDADES DE ALGUNS TRAÇADORES FLUORESCENTES. OS LIMITES DE DETECÇÃO REPRESENTAM A ORDEM DE MAGNITUDE E SÃO VÁLIDAS PARA ÁGUAS LIMPAS E FLUORÓMETRO MODERNO (ADAPTADO DE BENISCHKE ET AL., 2007 E BEHRENS ET AL., 2001).	58
TABELA 5.2 - PROPRIEDADES DE ALGUNS TRAÇADORES ARTIFICIAIS POR PARTÍCULAS OU BIOLÓGICOS. (ADAPTADO DE BENISCHKE ET AL., 2007 E BEHRENS ET AL., 2001).....	62
TABELA 5.3 - CARACTERÍSTICAS DAS EXPERIÊNCIAS DE TRAÇAGENS REALIZADAS NO MACIÇO DE SICÓ-ALVAIÁZERE.	69
TABELA 5.4 - CARACTERÍSTICAS DAS EXPERIÊNCIAS DE TRAÇAGENS REALIZADAS NA REGIÃO DE CHÃO DAS PIAS.	70
TABELA 5.5 - RESUMO DAS OPERAÇÕES DE TRAÇAGENS COM EIXO DE DESCARGA DO POLJE DE MINDE PARA AS NASCENTES DO BORDO DO MACIÇO CALCÁRIO ESTREMENHO.	71
TABELA 5.6 - RESUMO DAS OPERAÇÕES DE TRAÇAGENS COM EIXO DE CIRCULAÇÃO AFLUENTE AO POLJE DE MINDE.....	72
TABELA 5.7 - CARACTERÍSTICAS DA EXPERIÊNCIA DE TRAÇAGEM EFETUADA ENTRE AS TERRAS DO RISCO E A LAPA DOS MORCEGOS. .	73

Capítulo 7 - Caso Prático: A Captação do Olho de Mira (Maciço Calcário Estremenho)

TABELA 7.1 – VALORES DE TRANSMISSIVIDADE OBTIDOS PARA OS BOMBEAMENTOS DE MENOR DURAÇÃO, UTILIZANDO DIFERENTES EQUAÇÕES.	116
TABELA 7.2 - VALORES DE TRANSMISSIVIDADE OBTIDOS PARA OS BOMBEAMENTOS DE MAIOR DURAÇÃO, UTILIZANDO DIFERENTES EQUAÇÕES.	117
TABELA 7.3 - VALORES DOS TEMPOS T1, T2, T3 E T4, RESPECTIVO NÍVEL DA COLUNA DE ÁGUA E RESULTADOS DA APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES 2 A 4.	124
TABELA 7.4 - VALORES UTILIZADOS E RESULTADOS OBTIDOS PARA O CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO (S).....	125

Capítulo 1. Introdução

1.1. Importância dos aquíferos cársticos

Desde há muito que os aquíferos cársticos têm sido encarados como uma das principais origens de água para abastecimento das populações e para regadio. Estima-se que 20-25% da população mundial é abastecida por água proveniente de regiões cársticas (Ford & Williams, 1989). Pelo mundo fora, muitas são as cidades cujo abastecimento é assegurado por águas com essa origem: Montpellier (França), Dubrovnik (Croácia), Villanueva del Rosario (Espanha), Austin (EUA), Walkerton (Canadá) entre outras.

Portugal não é exceção, tendo o abastecimento de água à capital começado por ser feito, fundamentalmente, à custa de águas de aquíferos cársticos. Inicialmente o Aqueduto das Águas Livres transportava água para a cidade com origem nas nascentes do vale de Carenque, situadas a 10 km a noroeste de Lisboa. O abastecimento domiciliário iniciou-se após a construção do aqueduto do Alviela, que transportava para a capital uma parte do caudal da nascente do rio com o mesmo nome, a cerca de 100 km, no Maciço Calcário Estremenho. Posteriormente, o abastecimento foi reforçado com caudais captados por furos, perto das nascentes cársticas da Ota e de Alenquer (Paradela & Zbyszewski, 1971; Mendonça, 2013).

Outros concelhos são abastecidos por águas com origem em rochas carbonatadas, situam-se sobretudo na Estremadura e Beira Litoral (Cantanhede, Condeixa-a-Nova, Alcobaça, Alvaiázere, Peniche, Pombal, Porto de Mós, etc.), Alentejo (Sousel, Borba, Estremoz, Alandroal, etc.) e Algarve, onde os aquíferos cársticos contribuíram até há alguns anos com mais de 80% das águas para consumo humano e regadio (Peixinho de Cristo, 1988, Ramos et al., 1988).

1.2. O problema da caracterização do escoamento nos aquíferos cársicos

1.2.1. Caracterização do relevo

As regiões calcárias são, em geral, caracterizadas por aspetos particulares de relevo e circulação hídrica que constituem o modelado cársico, resultado da ação da água enriquecida em CO_2 que dissolve a rocha ao longo das discontinuidades que compartimentam os maciços nas diferentes escalas. A quantidade de rocha que pode ser dissolvida depende de diversas condições, como sejam o seu grau de pureza e composição, espessura e tipos de solos e de fatores climáticos, nomeadamente a temperatura e precipitação (Almeida, 1985).

Na Figura 1.1 é apresentado um esquema em que se representa a dinâmica inerente a estes sistemas, desde as formas de erosão que permitem a entrada da água no sistema cársico até às formas resultantes de deposição provocadas pela sua saída.

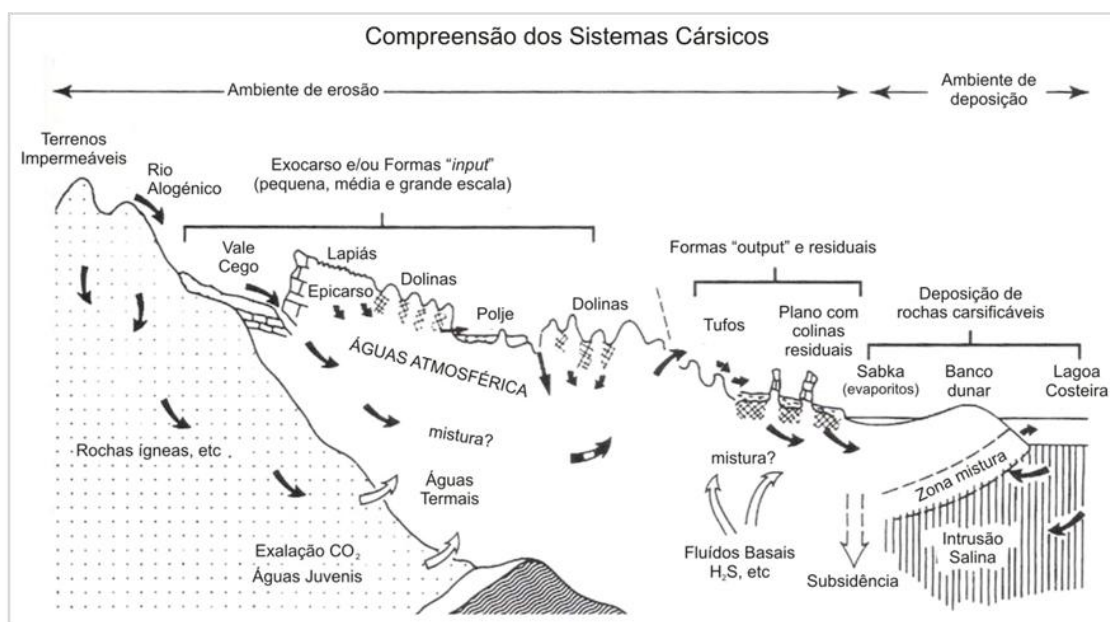


Figura 1.1 - Diagrama ilustrativo dos principais fenómenos que ocorrem nos terrenos cársicos. (in: Ford & Williams, 1989).

Várias são as formas de absorção presentes nas regiões calcárias como as superfícies rochosas sulcadas por fendas mais ou menos alargadas, os lapiás, as depressões fechadas com dimensões e formas variáveis, que podem ir desde as *dolinas*, com contornos simples e dimensão decamétrica a hectométrica, às *uvalas*, com contornos mais complexos e dimensão hectométrica, até aos *poljes*, com grandes extensões, de fundo plano parcialmente coberto por sedimentos e dimensão quilométrica. Os escassos vales presentes nas regiões cársicas podem ser *vales cegos*, isto é, terminam abruptamente em *sumidouros*. Se rios com caudal permanente conseguirem atravessar regiões cársicas, podem escavar profundas gargantas com vertentes verticais (*vales em canhão*), por vezes beneficiando do abatimento do teto de grutas intersectadas.

A água infiltrada nas fendas dos lapiás, nos sumidouros ou no fundo das dolinas e das uvalas, continua o seu processo de dissolução do maciço formando as *grutas*. As *lapas* e *algares* são designações para as grutas cuja entrada é, respetivamente, horizontal ou vertical. As grutas são constituídas por *galerias*, *salas* e *poços*, cuja complexidade aumenta como resultado da progressiva confluência das águas infiltradas, formando-se *redes subterrâneas* que podem atingir desenvolvimentos da ordem das dezenas de quilómetros. As águas infiltradas desembocam em *exurgências*, em geral com grandes caudais de ponta, que podem estar ou não associadas a redes subterrâneas.

1.2.2. Particularidades dos aquíferos cársicos: recarga e infiltração, armazenamento e descarga

As particularidades que ocorrem na circulação dos maciços calcários são resultado fundamentalmente de estes serem dotados de uma extensa rede de descontinuidades cujo alargamento progressivo, através da dissolução, dá origem a um sistema de escoamento subterrâneo, por vezes bastante organizado e hierarquizado. A distinção dos maciços calcários dos restantes maciços fraturados deve-se ao facto de nos primeiros se observar o alargamento progressivo das fraturas por dissolução enquanto nos segundos tal fenómeno não se verifica ou é pouco relevante.

Algumas condições têm de ocorrer no maciço calcário para que haja a sua evolução, nomeadamente a presença de uma rede mais ou menos desenvolvida de descontinuidades (diaclases, falhas, planos de estratificação...), a existência de uma zona de recarga e uma zona de descarga. A título de exemplo pode-se referir que só a nascente do Alviela remove em solução, anualmente, cerca de 24 000 toneladas de calcário, correspondentes à escavação de um volume de quase 10 000 m³ (Almeida, 1992). Um exemplo atual da evolução constante dos maciços calcários é o dos recentes abatimentos que ocorreram no Monte da Queijeira no Sistema Aquífero de Escusa (Dolomitos do Devónico médio). Estes abatimentos interseam o rio subterrâneo que alimenta a exurgência dos Olhos de Água e outras nascentes da Ribeira de Porto Espada (Crispim et al., 2013).

A anisotropia e heterogeneidade dos maciços são acentuadas com a evolução da drenagem, pois os sistemas de descontinuidades inicialmente mais aptos à circulação serão os mais alargados pela dissolução, evoluindo no sentido de constituírem eixos principais de escoamento. Assim, com o tempo, acentua-se o contraste entre as permeabilidades dos vários sistemas de fraturas conduzindo à existência de grande variação espacial das propriedades hidráulicas. Esta particularidade representa um dos grandes problemas na implantação de furos para captação e/ou monitorização de água, pois por vezes, ao lado de uma nascente caudalosa ou de um furo muito produtivo pode ter-se outro, ou outros, praticamente secos.

Conceptualmente, no comportamento hidráulico dos aquíferos cársicos considera-se a existência de dois meios com propriedades muito diferentes: um constituído por uma rede de coletores com permeabilidade elevada mas capacidade de armazenamento escassa (galerias freáticas) e outro constituído por blocos com permeabilidade baixa mas capacidade de armazenamento considerável, devido à existência de numerosas fissuras e poros de pequenas dimensões (epicarso). Às grandes fraturas e galerias cabe o papel transmissivo, isto é o de transportar a água através do maciço, na direção das zonas de descarga, enquanto o conjunto dos blocos cabe o papel capacitivo, isto é o de armazenar a água.

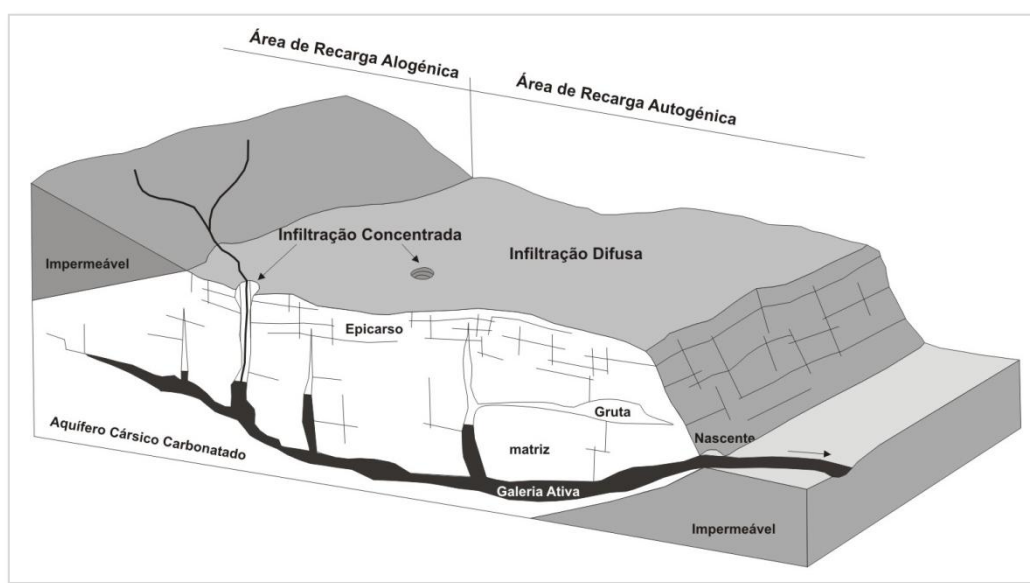


Figura 1.2 - Esquema ilustrativo da heterogeneidade de um aquífero cársico caracterizado pelos diferentes tipos de recarga (autogénica e alogénica), tipo de infiltração (concentrada e difusa) e as formas de escoamento (através de galerias ou na matriz) (in: Goldscheider et al., 2007).

Vários são os aspetos que devem ser conhecidos para que a contabilização dos recursos hídricos das regiões calcárias seja o mais próxima possível da realidade, nomeadamente o conhecimento das áreas com recarga alogénica ou autogénica e os locais preferenciais de infiltração concentrada ou difusa (Figura 1.2). Dificuldades na estimativa da precipitação são frequentes pois muitas vezes apenas existem dados relativos a postos de observação com altitudes que não são representativas da altitude média das áreas de recarga ou com periodicidades de registo inadequados para o objetivo em questão. Outro problema que se coloca para avaliação dos recursos é a reconhecida dificuldade em delimitar as bacias drenadas pelas nascentes.

1.2.3. Motivação, objetivo e organização do presente trabalho

As regiões calcárias não possuem muitas vezes uma circulação superficial bem estruturada, predominando uma circulação subterrânea bem desenvolvida que origina nascentes de grande

caudal. Devido às particularidades já enunciadas, a exploração dos recursos hídricos em aquíferos cársicos apresenta numerosos problemas associados à pequena capacidade de regulação dos reservatórios cársicos, irregularidade do padrão de circulação subterrânea e elevada vulnerabilidade à poluição. Para a resolução destas questões tem contribuído um número cada vez maior de trabalhos que constituem atualmente um corpo teórico ou prático de complexidade crescente, cuja aplicabilidade/utilidade nem sempre é fácil avaliar.

Os avanços tecnológicos têm sido galopantes nas últimas décadas e o conhecimento científico tem conseguido tirar o melhor proveito desse ritmo. As metodologias utilizadas no estudo do escoamento em aquíferos cársicos têm beneficiado deste desenvolvimento, na tentativa de resolver alguns dos problemas associados aos mesmos. Assim, o presente trabalho tem como objetivo a análise de algumas das metodologias utilizadas a nível internacional e referir onde ocorreram estudos idênticos nos aquíferos cársicos de Portugal. A componente prática incide na aplicação de algumas dessas metodologias no tratamento de dados, interpretação de ensaios de bombeamento e ajustamento a curvas de recessão da Captação do Olho de Mira (Maciço Calcário Estremenho). O presente trabalho encontra-se estruturado da seguinte forma:

Unidades Hidrogeológicas, Aquíferos Carbonatados e Abastecimento Público: Das quatro unidades hidrogeológicas presentes em Portugal, coincidentes com as unidades morfoestruturais definidas por Ribeiro et al., (1979), três apresentam condições geológicas e geomorfológicas que permitem a existência de regiões cársicas. Neste capítulo resumem-se as características principais destas regiões, seus aquíferos e a sua importância no abastecimento público em Portugal.

Investigação Espeleológica: A investigação espeleológica tem como objeto de estudo as cavidades suficientemente largas que permitem a entrada do homem, fornecendo informações valiosas ao estudo da hidrogeologia das regiões cársicas. Aqui pretende-se expor a evolução do pensamento sobre o escoamento destas regiões. As técnicas, que de algum modo são do domínio da espeleologia e que contribuem para o conhecimento do escoamento, também são aqui apresentadas.

Métodos Geofísicos: A aplicação dos métodos geofísicos no reconhecimento das regiões calcárias pode fornecer informações bastante úteis, como a posição do nível freático ou a localização de cavidade. Assim, pretende-se descrever os princípios básicos, vantagens e desvantagens dos métodos elétricos e eletromagnéticos aplicados nas regiões cársicas portuguesas e referenciar alguns dos trabalhos desenvolvidos, quer no âmbito nacional quer internacional.

Traçagens com Traçadores Artificiais: A investigação das áreas de recarga e direções de escoamento são dos principais objetivos da hidrogeologia, sendo os testes de traçagem uma das técnicas mais poderosas na investigação das regiões calcárias (Benischke et al., 2007). Neste capítulo é efetuada uma abordagem aos traçadores artificiais mais empregues atualmente, descrevendo-se

sucintamente os que já foram utilizados em Portugal (traçadores fluorescentes: fluoresceína sódica (uranina), rodaminas, tinopal; traçadores em partículas ou traçadores biológicos: bacteriófagos). Abordam-se as técnicas de injeção e reconhecimento do traçador assim como a avaliação e interpretação dos dados obtidos nos testes de traçagens. É também feita uma resenha da aplicação desta técnica nas regiões cárscicas portuguesas e suas conclusões.

Metodologias para Análise do Escoamento nos Aquíferos Cárscicos: A anisotropia e heterogeneidade natural dos aquíferos cárscicos dificultam a compreensão da estrutura e das propriedades hidráulicas destes meios. O conhecimento do funcionamento e interação entre os seus diferentes subsistemas é fundamental, não só para a exploração e gestão dos recursos hídricos existentes, mas também na sua proteção.

De entre as várias metodologias apropriadas para quantificar e analisar o escoamento dos subsistemas cárscicos, salientam-se os hidrogramas e quimiogramas de nascente e os ensaios de bombagem, que a seguir se desenvolvem.

Caso prático: A captação do Olho de Mira (Maciço Calcário Estremenho): A análise da variação do nível de água no poço da captação do Olho de Mira, com auxílio de algumas das metodologias aplicadas ao estudo do escoamento em aquíferos cárscicos, é o exemplo prático do presente trabalho. Este é iniciado com o enquadramento geológico, geomorfológico e hidrogeológico do Maciço Calcário Estremenho, seguindo-se o enquadramento da nascente e captação do Olho de Mira, quer do ponto de vista histórico pela importância que tem representado para as populações locais, quer pelos trabalhos já aí efetuados. Posteriormente é avaliada a influência da precipitação na variação do nível de água no poço, é calculada a transmissividade a partir dos rebaixamentos provocados pelas bombas em extração para abastecimento público e analisada a curva de recessão do último pico de cheia registado. Algumas questões pertinentes são equacionadas, direcionando assim futuros trabalhos.

1.3. Referências bibliográficas

- Almeida, C. (1985). *Hidrogeologia do Algarve Central*. (Tese de Doutoramento), Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Almeida, C. (1992). Aspectos da exploração e protecção dos Recursos hídricos em regiões calcárias. *Indústria da Água*(6), 51-52.
- Benischke, R., Goldscheider, N., & Smart, C. (2007). Tracer techniques. In N. Goldscheider & D. Drew (Eds.), *Methods in Karst Hydrogeology* (pp. 147-170). Londres: Taylor & Francis/Balkema.
- Crispim, J. A., Rézio, H., Almeida, C., & Sena, J. (2013). Exploração do Algar do Monte da Queijeira <http://spe.pt/espeleologia/prospeccao-e-cadastro/351-exploracao-do-algar-do-monte-da-queijeira>.
- Ford, D. C., & Williams, P. W. (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology*. London: Unwin Hyman.

- Goldscheider, N., Drew, D., & Worthington, S. (2007). Introduction. In N. Goldscheider & D. Drew (Eds.), *Methods in Karst Hydrogeology* (pp. 1-7). Londres: Taylor & Francis/Balkema.
- Mendonça, J. L. (2013). As águas subterrâneas e o abastecimento de água a Lisboa no século XX. 9^o *Seminário sobre Águas Subterrâneas*. (pp. 114-117). Campus da Caparica: APRH & FCT-UNL.
- Paradela, P., & Zbyszewski, G. (1971). *Hidrogeologia geral do centro e sul de Portugal*. Artigo apresentado ao I Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica, Lisboa.
- Peixinho de Cristo, F. (1988). *Análise dos sistemas de abastecimento público de águas nos distritos de Aveiro, Coimbra e Leiria*. Lisboa: Min. Plan. Admin. Territ. (Dir. Geral Rec. Naturais / Dir. Serv. Hidrologia / Div. Geohidrologia).
- Ramos, L., Nuncio, T., Borralho, M. E., Pais, J. R., & Vlachos, E. (1988). *Os recursos hídricos no sul de Portugal*. (Vol. II). Lisboa: Ministério do Planeamento e da Administração do Território.
- Ribeiro, A., Antunes, M. T., Ferreira, M. P., Rocha, R. B., Soares, A. F., Zbyszewski, G., Almeida, F. M., Carvalho, D., Monteiro, D. (1979). *Introduction à la Géologie Générale du Portugal*. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.

Capítulo 2. Unidades Hidrogeológicas, Aquíferos Carbonatados e Abastecimento Público

Das quatro unidades hidrogeológicas presentes em Portugal, coincidentes com as unidades morfoestruturais definidas por Ribeiro et al., (1979), três apresentam condições geológicas e geomorfológicas que permitem a existência de regiões cársticas. Neste capítulo resumem-se as características principais destas regiões, seus aquíferos e a sua importância no abastecimento público em Portugal.

2.1. Unidades Hidrogeológicas

A distribuição dos recursos hídricos subterrâneos está profundamente relacionada com a história geológica de determinada região. O Maciço Antigo abrange cerca de 70% do continente e é essencialmente constituído por rochas eruptivas e metassedimentares, de idade pré-câmbrica e paleozóica, enrugadas ou deslocadas por vários ciclos orogénicos, de entre os quais os movimentos hercínicos. Aqui, os principais aquíferos estão normalmente associados à presença de maciços calcários. Nas bacias meso-cenozóicas localizam-se o maior número de aquíferos, os mais produtivos e os com maior abundância de recursos. Estas bacias são formadas essencialmente por rochas detríticas e/ou carbonatadas onde os fenómenos de metamorfismo são praticamente inexistentes.

A correspondência entre a distribuição e características dos aquíferos e as unidades geológicas já tinha sido notada por diversos autores, tendo constituído a base para o estabelecimento, pelo INAG, de quatro unidades hidrogeológicas (Almeida et al., 2000) que correspondem às grandes unidades morfoestruturais em que o país se encontra dividido (Ribeiro et al., 1979). Essas unidades hidrogeológicas são o Maciço Antigo (também designado por Maciço Ibérico ou Maciço Hespérico), a Orla Mesocenozóica Ocidental (também designada por Orla Ocidental), a Orla Mesocenozóica

Meridional (também designada por Orla Meridional) e a Bacia Terciária do Tejo-Sado (também designada por Bacia do Tejo-Sado)

Nas Orlas Meso-cenozóicas se excetuarmos os maciços eruptivos de Sintra e Monchique, todos os relevos principais são constituídos por formações carbonatadas e muitas delas apresentam formas cársicas muito desenvolvidas, quer do tipo endocársico, quer exocársico. No Maciço Antigo são conhecidas manchas com interesse na exploração dos recursos hídricos na Zona Centro Ibérica e na Zona de Ossa Morena. Na Zona Centro Ibérica localizam-se pequenas manchas de formações carbonatadas, essencialmente no norte do país. Já na Zona de Ossa Morena as principais elevações são constituídas por formações carsificáveis e constituem o suporte dos aquíferos mais produtivos do Maciço Antigo. Na Figura 2.1 é possível observar a localização das principais regiões cársicas de Portugal.

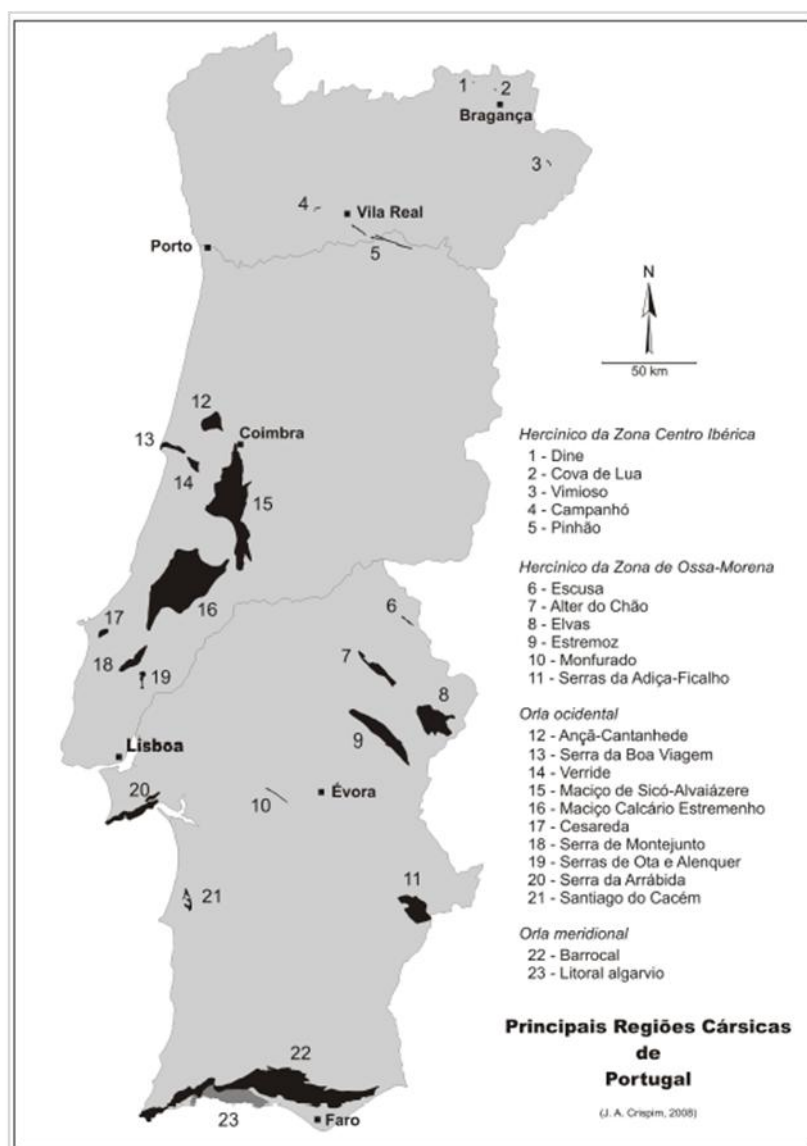


Figura 2.1 - Principais regiões cársicas de Portugal (in: Crispim, 2010b)

2.1.1. Maciço Antigo

O Maciço Antigo ocupa cerca de 70% de Portugal continental. Ocorrem aí, maioritariamente, rochas eruptivas e metassedimentares, de forma genérica designadas por rochas cristalinas. Uma das características destas litologias é a fraca aptidão hidrogeológica embora tenham um papel importante a nível local, tanto nos abastecimentos públicos como para a agricultura. As rochas carbonatadas são em geral a exceção à regra por apresentarem produtividades com importância regional assinalável.

Hidrogeologicamente, o Maciço Antigo é caracterizado por uma relativa monotonia onde é possível considerar algumas subunidades, com características próprias e que correspondem às suas divisões geoestruturais: Zona Galiza Média – Trás-os-Montes, Zona Centro Ibérica, Zona de Ossa Morena e Zona Sul Portuguesa. Na Zona Centro Ibérica foi delimitado o Sistema Aquífero A2 - Escusa com comportamento cársico, embora por toda a unidade sejam conhecidos afloramentos carbonatados com comportamento cársico que, por serem de pequenas dimensões, não foram individualizados (Almeida et al. 2000). As principais ocorrências de rochas calcárias situam-se em Trás-os-Montes (calcários ordovícicos ou silúricos), vale do Douro (Grupo do Douro Autóctone do Proterozoico superior), Campanhó (Silúrico) e Dornes (Devónico) (Figura 2.1). Devido à sua importância para as populações locais, faz-se aqui um pequeno enquadramento a estes afloramentos:

- Nos concelhos de Miranda do Douro e Vimioso afloram pequenas manchas de calcários pertencentes à Formação de Santo Adrião, datada do Ordovício superior (Pereira et al., 2006). O afloramento presente em Cova de Lua (concelho de Bragança) foi objeto de estudo por Fernandes (1992). É constituído por blocos de natureza calcária, de idade silúrica, aparentemente descontínuos, com uma área de afloramento muito reduzida. Este autor defende que os recursos e a produtividade do sistema fazem supor que o volume total do reservatório deverá ser muito superior ao que se pode deduzir a partir da observação em superfície. É provável que exista um desenvolvimento significativo de corpos calcários ocultos sob outras formações e, além disso, é possível que estes atuem como um dreno das outras litologias, que teriam comportamento semelhante ao de um aquífero. Embora os afloramentos presentes em Dine nunca tenham sido objeto de estudo, acredita-se que tenham algumas semelhanças com os afloramentos de Cova de Lua, já que também apresentam um endocarso com algum desenvolvimento (Fernandes, 1992).

- No Vale do Douro ocorre a Formação de Bateiras, a mais antiga do Grupo do Douro Autóctone datado do Proterozoico superior (Pereira et al., 2006), constituída por mármore calcítico e, mais raramente, dolomítico. As manchas mais importantes situam-se a SW e SE de Pinhão, concelho de Alijó.

- Em Campanhó, concelho de Mondim de Basto, existem vários afloramentos de um calcário negro, com elevada componente siliciosa, todos com reduzida extensão, pertencentes à Formação de Campanhó e Ferradosa, do Silúrico inferior (Pereira et al., 2006). Apesar da reduzida área de afloramento, estes calcários dão origem a uma nascente (Olho Marinho) que apresenta um caudal relativamente elevado (Almeida et al., 2000).

- Em Dornes, concelho de Ferreira do Zêzere, aflora formação com o mesmo nome constituída por calcários dolomitizados arenitos e pelitos com braquiópodes, bivalves e crinóides, datadas do Devónico inferior (Teixeira, 1981; Gutiérrez-Marco et al., 1998). Esta formação é contemporânea da formação de S. Mamede, base do Sistema Aquífero de Escusa (A2).

Todos estes afloramentos estão, segundo Crispim (2007), em contexto de *stripe karst* por apresentarem áreas de afloramento bastante mais pequenas que as áreas que contribuem para a sua recarga. Este tipo de situação é bastante comum, por exemplo, na península escandinava (Lauritzen, 2001).

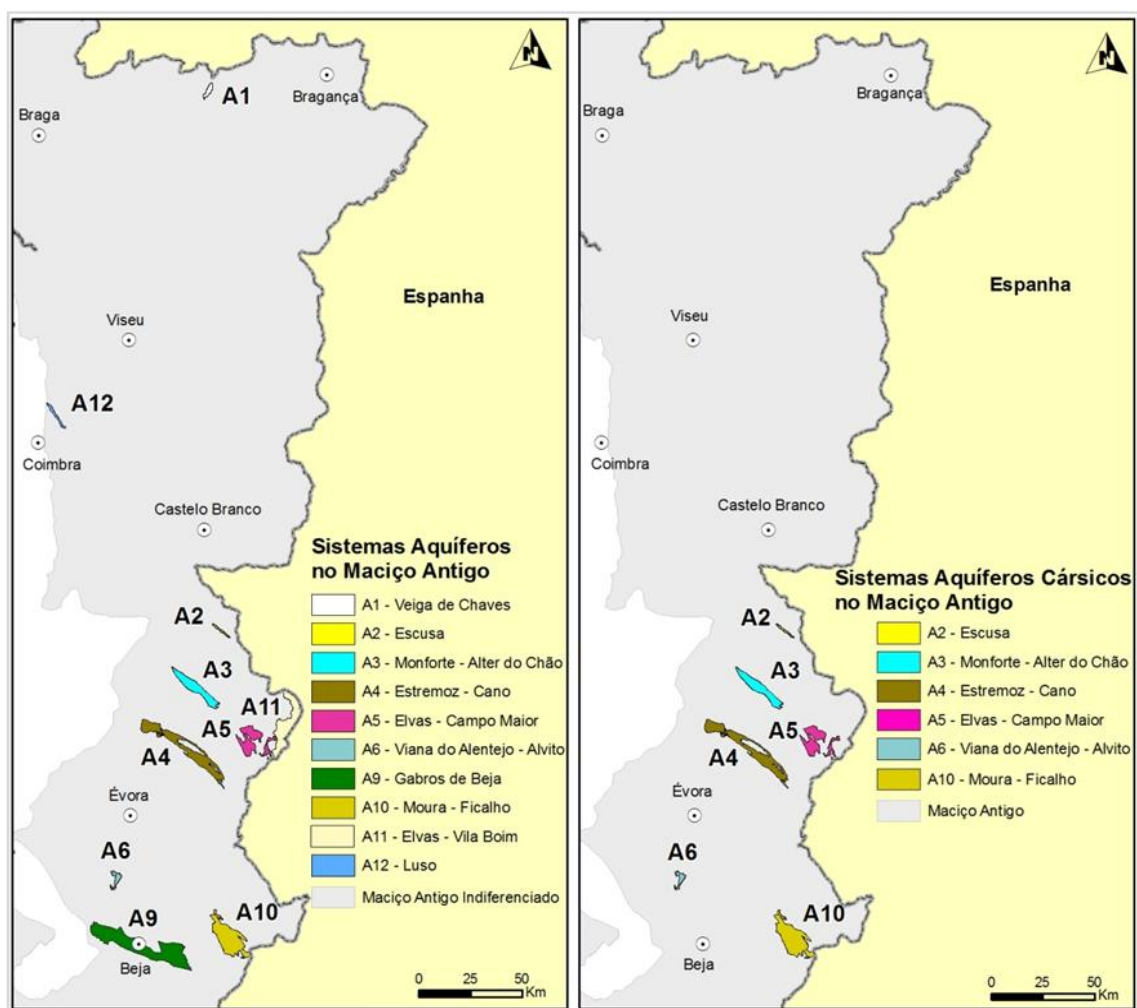


Figura 2.2 - Localização do conjunto dos sistemas aquíferos do Maciço Antigo (lado esquerdo) e apenas os que têm comportamento cárstico (lado direito) (adaptado de Almeida et al., 2000).

Na Zona de Ossa Morena ocorre um enquadramento idêntico, por exemplo, na região de Montemor-o-Novo, onde os mármore do Câmbrio inferior formam uma faixa na qual se localiza a conhecida Gruta do Escoural (Santos, 1964; Crispim, 2007). Mais para leste ocorre a maioria dos sistemas aquíferos com comportamento cársico do Maciço Antigo, que são o A3 - Monforte-Alter do Chão, A4 - Estremoz-Cano, A5 - Elvas-Campo Maior, A6 - Viana do Alentejo - Alvito e A10 - Moura-Ficalho.

Na Figura 2.2 observa-se do lado esquerdo, a localização de todos os sistemas aquíferos no Maciço Antigo e do lado direito apenas os que apresentam comportamento cársico. No Anexo 1 estão reunidas as características principais destes aquíferos, de acordo com Almeida et al., 2000.

2.1.2. Orla Ocidental

A Orla Ocidental é constituída por terrenos que se depositaram na Bacia Lusitânica. Esta é uma bacia sedimentar que se desenvolveu na Margem Ocidental Ibérica durante parte do Mesozóico e a dinâmica da sua formação enquadra-se no contexto da fragmentação da Pangeia, mais especificamente da abertura do Atlântico Norte (Kullberg et al., 2006). Esta bacia forma uma depressão alongada, com orientação NNE-SSW, na qual a espessura máxima de sedimentos deve ser da ordem dos 5000 m (Ribeiro et al., 1979). Faz fronteira a leste com o Maciço Antigo através da falha Porto-Coimbra-Tomar, a sul pelo ramo desta fratura, com direção NNE, que se estende até ao canhão de Setúbal e a ocidente por um *horst* hercínico, atualmente materializado pelos granitos e rochas metamórficas do arquipélago da Berlengas.

Do ponto de vista hidrogeológico, na Orla Ocidental, os sistemas aquíferos cársicos têm por suporte os calcários e dolomitos pertencentes ao Jurássico inferior (Sinemuriano), Jurássico médio e Jurássico superior (Oxfordiano). É nas formações do Jurássico médio que se encontram os calcários mais puros, compactos e espessos que constituem a ossatura das principais elevações.

Crispim (2010a) apresenta uma série de aspetos relevantes do património cársico presentes na Orla Ocidental em que os mais importantes, de norte para sul, são o Maciço de Sicó-Alvaiázere, o Maciço Calcário Estremenho, a Serra de Montejunto e a Serra da Arrábida. Estes dois últimos relevos não se encontram incluídos no Inventário dos Sistemas Aquíferos de Portugal Continental (Almeida et al., 2000). A Serra de Montejunto tem maior relevância pelo edifício estrutural, embora vários fenómenos cársicos mereçam menção, como algumas dolinas do cimo da serra, extensos lapiás e inúmeras grutas (Crispim, 2008). Apesar da elevada recarga e correspondente circulação subterrânea, não são conhecidas exsurgências importantes que sejam a descarga direta dessa circulação. Supõe-se que a circulação se faça talvez para o Sistema Aquífero Ota-Alenquer já que determinações de trítio apoiam a hipótese de mistura de águas (Almeida et al, 2000). O perímetro de proteção alargado para as captações da EPAL inseridas neste sistema aquífero englobam as litologias

do Jurássico médio e superior aflorantes na Serra de Montejunto (Portaria n.º 1187/2010 de 17 de novembro).

A Serra da Arrábida é também um relevo calcário fortemente influenciado pela estrutura (Kullberg et al., 2000) cujas rochas carbonatadas, particularmente as do Jurássico médio, se encontram carsificadas apresentando campos de lapiás e várias grutas. A Gruta do Frade constitui o fenómeno endocársico mais espetacular da região pela importância das cristalizações que abriga (NECA, 2005). São quase inexistentes pontos de captação de água e desconhece-se as condições de circulação e emergência das águas subterrâneas, embora já se tenha posto em evidência a ligação entre os sumidouros da depressão da Terra da Freira e a Gruta dos Morcegos, no Fojo (Crispim et al., 2006).

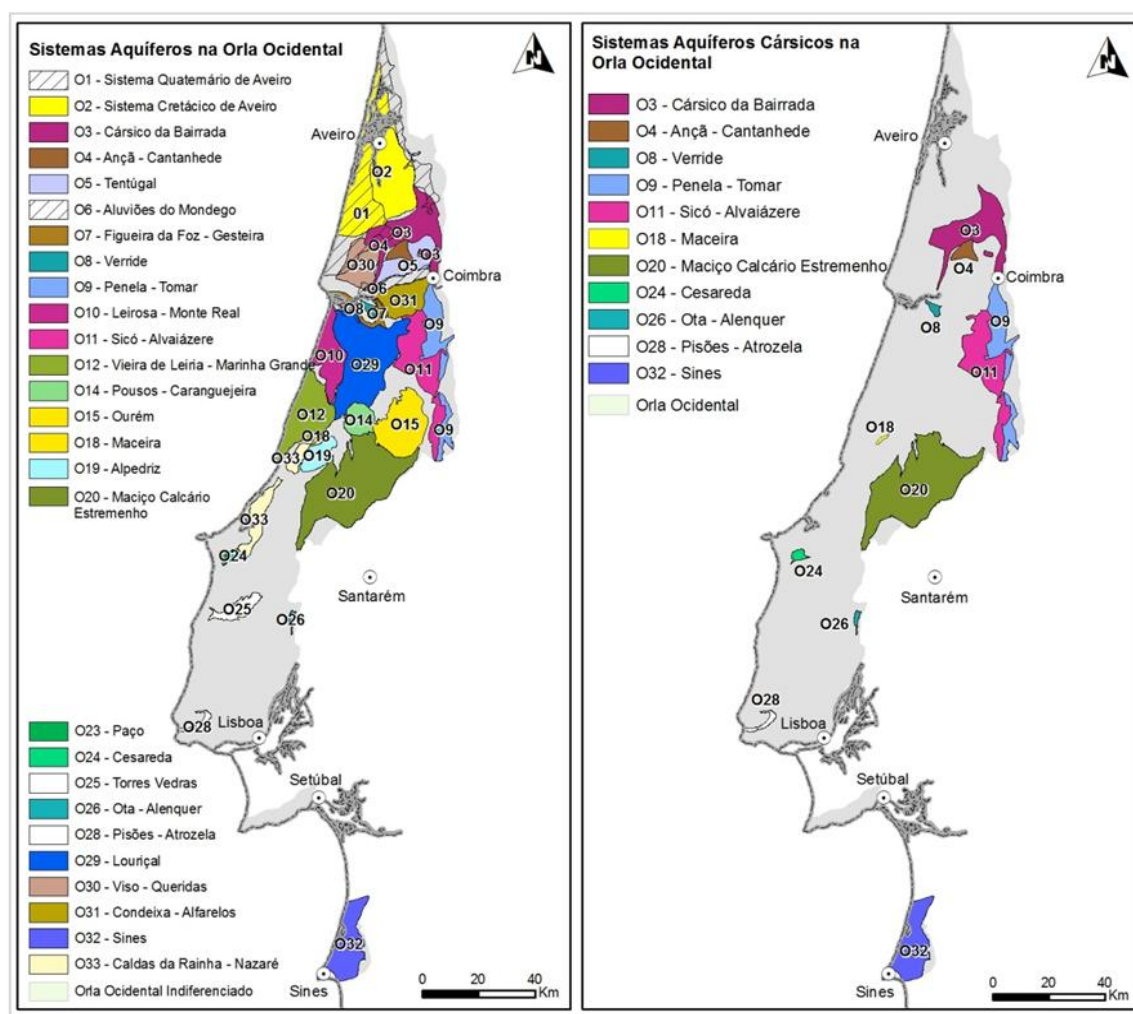


Figura 2.3 - Localização do conjunto dos sistemas aquíferos da Orla Ocidental (lado esquerdo) e apenas os que têm comportamento cársico (lado direito) (adaptado de Almeida et al., 2000).

Existem outros pequenos afloramentos que são responsáveis pela presença de caudais apreciáveis, como o caso das formações pertencentes ao Cretácico nos arredores de Lisboa (Jesus, 1995) e que no passado também foram explorados para abastecimento à capital através do Aqueduto das Águas Livres com águas provenientes de Caneças, Belas e Salgueiro Grande (Mendonça, 2013).

Dos 27 sistemas aquíferos presentes na Orla Ocidental 11 têm comportamento cársico sendo eles: O3 - Cársico da Bairrada, O4 - Ançã-Cantanhede, O8 - Verride; O9 - Penela-Tomar, O11 - Sicó-Alvaiázere, O18 - Maceira, O20 - Maciço Calcário Estremenho, O24 - Cesareda, O26 - Ota-Alenquer, O28 - Pisões-Atrozela e O32 - Sines. Na Figura 2.3 observa-se do lado esquerdo a localização de todos os sistemas aquíferos da Orla Ocidental e do lado direito apenas os que apresentam comportamento cársico. No Anexo 1 estão reunidas as características principais destes aquíferos, de acordo com Almeida et al., 2000.

2.1.3. Orla Meridional

A Orla Meridional ou a Bacia do Algarve corresponde, de uma forma muito genérica, aos terrenos mesoceno-zóicos que afloram no sul de Portugal, entre Sagres e Vila Real de Santo António (≈ 140 km) penetrando irregularmente para o interior entre 3 km a 25 km, sobre terrenos do Carbonífero da Zona Sul Portuguesa (Terrinha et al., 2013).

Do ponto de vista estrutural a Orla Meridional compreende rochas que se formaram em bacias com características diferentes, uma resultante de estiramento litosférico e subsidência, preenchida por sedimentos desde o Triásico ao Cenomaniano, à qual se sobrepõe uma bacia cenozoica, *pós-rifting*, onde se depositaram sedimentos de idades compreendidas entre o Miocénico e o Quaternário. Estas duas bacias estão separadas por uma descontinuidade marcadamente erosiva, geralmente uma discordância, podendo os sedimentos neogénicos assentar diretamente sobre as rochas anteriores mesozóicas, do Triásico ao Cretácico, ou mesmo sobre as rochas do soco paleozoico (Terrinha et al., 2013). As falhas que atualmente têm direção N-S terão desempenhado um papel importante na subdivisão da bacia, durante o mesozóico, de acordo com a variação de fáceis e de espessuras que aumentam de W para E.

Do ponto de vista hidrogeológico, os aquíferos mais importantes da orla meridional estão instalados nas formações do Jurássico inferior e médio. Estas formações conferem boas propriedades hidráulicas aos aquíferos, em grande parte devido aos processos de dolomitização secundária a que foram sujeitos. O Jurássico superior também é caracterizado por propriedades hidrogeológicas semelhantes às do Jurássico inferior e médio, embora com menos extensão de afloramento (Almeida et al., 2000). Os aspetos da morfologia cársica apresentam algum desenvolvimento na bacia do Algarve, onde ocorrem todos os tipos de lapíás (com grande extensão para o megalapíás), depressões (p.e. o polje da Nave do Barão ou o *polje aberto* da Nave dos Cordeiros), os *algarões* – toponímia local para algar – (p.e. o Algarão do Escarpão ou o Algarão do Penedo da Carreira), entre outras (Almeida, 1985; Crispim, 1982, 1987; Almeida & Crispim, 1987; Lopes, 2006; Gago, 2007).

Dos 17 sistemas aquíferos presentes na Orla Meridional, 12 têm comportamento cársico e/ou misto (cársico-poroso), sendo eles: M1 - Covões, M2 - Almádena-Odeóxere, M3 - Mexilhoeira Grande-

Portimão, M5 - Querença-Silves, M6 - Albufeira-Ribeira de Quarteira, M7 - Quarteira, M8 - São Brás de Alportel, M9 - Almansil-Medronhal, M11 - Chão de Cevada-Quinta João de Ourém, M13 - Peral-Moncarapacho, M14 - Malhão e M16 - São Bartolomeu.

Na Figura 2.4 observa-se, em cima, a localização de todos os sistemas aquífero na Orla Meridional e em baixo apenas os que apresentam comportamento cársico. No Anexo 1 estão reunidas as características principais destes aquíferos, adaptado de Almeida et al., 2000.

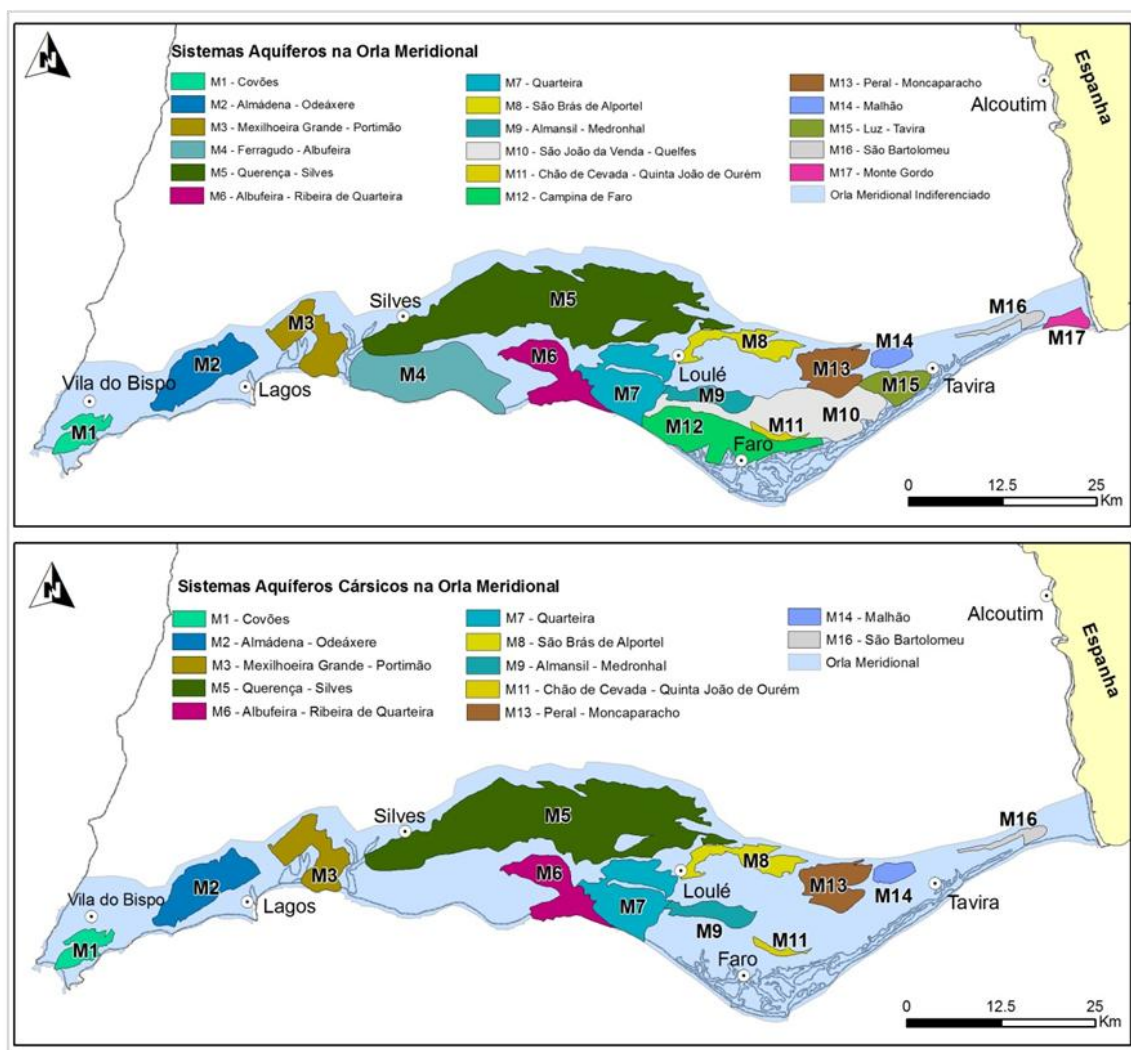


Figura 2.4 - Localização do conjunto dos sistemas aquíferos da Orla Meridional (em cima) e apenas os que têm comportamento cársico (em baixo) (adaptado de Almeida et al., 2000).

2.2. Abastecimento de água em Portugal Continental

Estudos realizados no início da década de 90 do século passado estimaram que as águas subterrâneas constituíam 70% a 80% do abastecimento doméstico, industrial e agrícola do continente (Lobo Ferreira et al., 1995).

A campanha de recolha de dados do INSAAR (Inventário Nacional Sistemas de Abastecimento de Águas e Águas Residuais) encontra-se atualmente suspensa, mas dado o interesse que os dados de

anteriores campanhas continuam a suscitar, a APA (Agência Portuguesa do Ambiente) continua a disponibilizar os dados ao público. Os dois últimos relatórios sobre o abastecimento de água e o tratamento de águas residuais (sistemas públicos urbanos), publicados no seu sítio de internet (<http://insaar.apambiente.pt/>), INSAAR (2010) e INSAAR (2011), são referentes ao ano de 2008 e 2009 respetivamente onde concluíram que 34% da população do continente era abastecida por água de origem subterrânea e 66% por água de origem superficial.

Embora apenas <2,5% do território nacional seja ocupado por aquíferos carbonatados estes têm alguma importância por se situarem em áreas com elevada densidade populacional (Almeida et al., 1995). Qual é efetivamente a contribuição destes aquíferos, ou seja, qual o volume e população abastecida em Portugal com água subterrânea com origem em regiões carbonatadas é uma das respostas que se pretende obter através da análise dos dados disponíveis no sítio da Internet do INSAAR (INSAAR (2010) com dados de 2008).

No Anexo 1 encontram-se compilados os sistemas aquíferos do continente com comportamento cársico, num total de 26: seis no Maciço Antigo, onze na Orla Ocidental e nove na Orla Meridional.

Na tabela de dados do INSAAR (2010) foi feita a triagem dos dados eliminando-se as captações fora do continente, as de origem superficial e as captações em concelhos onde não existem áreas de interesse; raciocínio idêntico foi seguido para as freguesias. A localização das captações foram obtidas através do *INTERSIG* - um gestor de informação geográfica - (<http://intersig.apambiente.pt/intersig/>). A tabela com as 194 captações apuradas encontra-se no Anexo 2 e na Figura 2.5.

Na campanha do INSSAR (2010) foram registadas 5615 captações de água subterrânea para Portugal Continental. A Tabela 2.1 apresenta a localização dessas captações por unidades hidrogeológicas e por tipo de comportamento do aquífero (cársico ou não cársico).

Tabela 2.1 - Número de captações por tipo de aquífero.

Unidade Hidrogeológicas	Tipo de Comportamento do Aquífero				Total
	Cársico		Não Cársico		
	N.º total de captações	%	N.º total de captações	%	
Continente	194	3	5 421	97	5 615
Maciço Antigo	80	2	4 518	98	4 598
Orla Ocidental	65	18	305	82	370
Orla Meridional	49	57	37	43	86
Bacia do Tejo-Sado	n.a.	n.a.	561	100	561

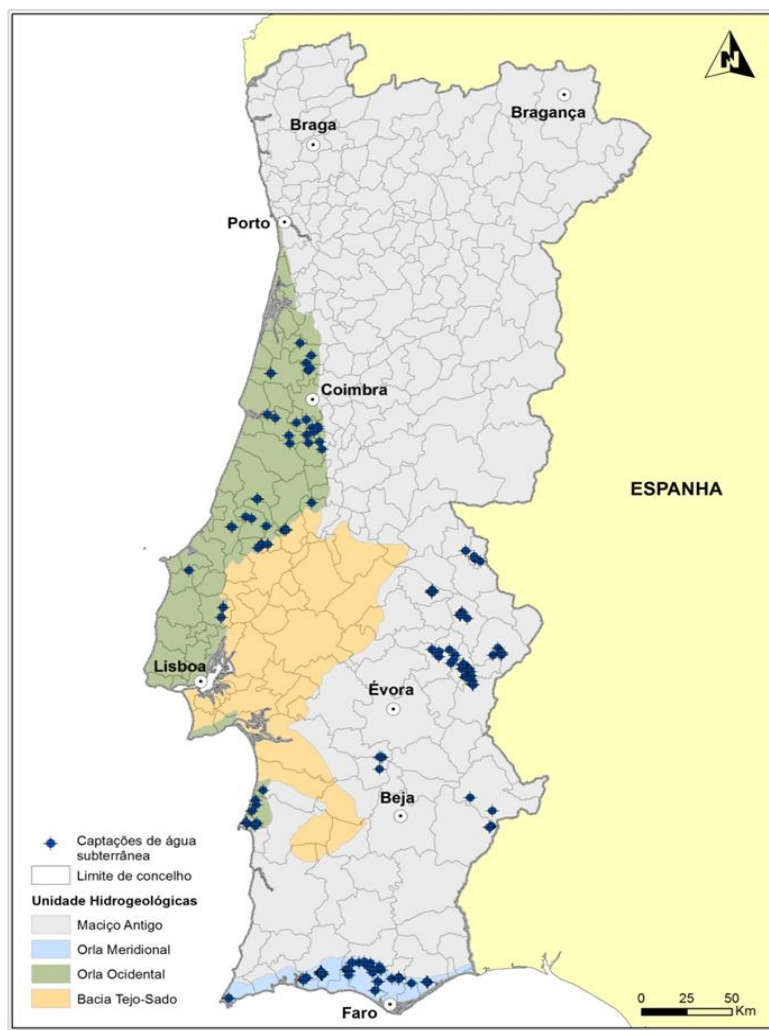


Figura 2.5 - Localização geográfica das captações de água subterrânea que se localizam em sistemas aquíferos com comportamento cársico.

Na Tabela 2.2 observam-se os volumes de água subterrânea captado anualmente no Continente por unidades hidrogeológicas e por tipo de comportamento do aquífero (cársico ou não cársico).

Tabela 2.2 - Volume de água captado, por tipo de comportamento do aquífero.

Unidade Hidrogeológicas	Tipo de Comportamento do Aquífero				Total 10 ³ m ³
	Cársico		Não Cársico		
	Volume 10 ³ m ³	%	Volume 10 ³ m ³	%	
Continente	52 918	21	195 337	79	248 255
Maciço Antigo	5 773	11	46 080	89	51 853
Orla Ocidental	35 470	45	42 920	55	78 390
Orla Meridional	11 675	97	315	3	11 990
Bacia do Tejo-Sado	n.a.	n.a.	106 022	100	106 022

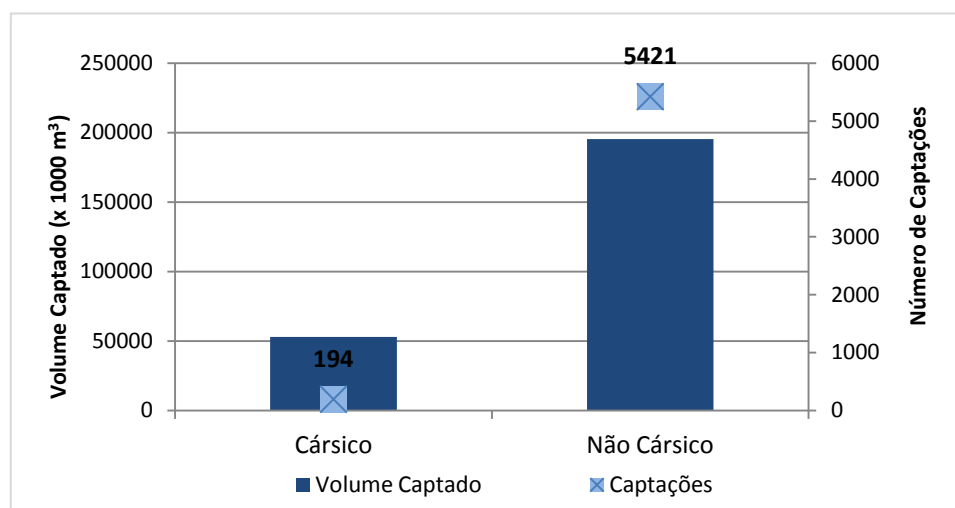


Figura 2.6 - Número de captações e volume captado por tipo de comportamento do aquífero.

Atualmente, a Orla Meridional é abastecida, maioritariamente, por águas de origem superficial pelo que relativamente a esta unidade hidrogeológica as captações mencionadas encontram-se com “funcionamento de recurso”. Como consequência disso mesmo é expectável que atualmente os volumes sejam mais baixos do que os referidos na Tabela 2.2 e Figura 2.6.

Do volume total captado na Orla Ocidental, 45% tem origem em aquíferos carbonatados. No Maciço Antigo, com um número de captações mais baixo (2%) estas são responsáveis por 13% do volume captado.

Embora apenas 3% das captações de água subterrânea do continente estejam localizadas em aquífero carbonatados com comportamento cársico, estas representam 21% do volume captado no ano de 2008. Se ignorarmos a Orla Meridional, pelas razões já mencionadas, este volume deverá rondar os 18%.

2.2.1. As captações registadas no INSAAR 2010

O facto de as captações localizadas na Orla Meridional, maioritariamente no sistema aquífero M5 - Querença-Silves, se encontrarem atualmente com “funcionamento de recurso” não torna relevante uma avaliação mais pormenorizada desta unidade hidrogeológica. Assim nas próximas linhas serão abordados os dados referentes ao Maciço Antigo e à Orla Ocidental.

Na Tabela 2.3 apresenta-se a distribuição geral das captações pelas três unidades hidrogeológicas inseridas em sistemas aquíferos carbonatados e a população servida e volume anual captado pelo Maciço Antigo e Orla Ocidental.

Tabela 2.3 - N.º de captações, população servida e volume anual captado.

Unidade Hidrogeológicas	N.º captações	População servida	Volume captado anualmente (10³ m³)
Maciço Antigo	80	84 339	5 773
Orla Ocidental	65	375 694	35 470
Orla Meridional	49	n.a.	n.a.
TOTAL	194	459 143	41 243

O maior número de captações localizadas em regiões carbonatadas pertence ao Maciço Antigo, sendo responsável pelo abastecimento de mais de 84 000 habitantes aí residente. Por sua vez, os aquíferos carbonatados da Orla Ocidental contribuem com 45% do volume extraído abastecendo mais de 375 000 habitantes aí domiciliados.

A contribuição dos aquíferos do Maciço Antigo e da Orla Ocidental vão ser analisados de seguida.

2.2.2. Maciço Antigo

Na Tabela 2.4, Figura 2.7 e Figura 2.8 apresenta-se a distribuição da população servida, número de captações e volume anual captado das massas de água subterrânea das regiões carbonatadas.

Tabela 2.4 - Distribuição do n.º de captações, população servida e volume anual captado do Maciço Antigo pelos seus sistemas aquíferos.

Sistemas Aquíferos	N.º captações	População servida	Volume captado anualmente (10³ m³)
A2 – Escusa	7	8419	936
A3 – Monforte-Alter do Chão	17	4472	261
A4 – Estremoz-Cano	41	53953	2912
A5 – Elvas-Vila Boim	6	2226	224
A6 – Viana do Alentejo-Alvito	4	3241	348
A10 – Moura-Ficalho	5	12028	1092
TOTAL	80	84339	5773

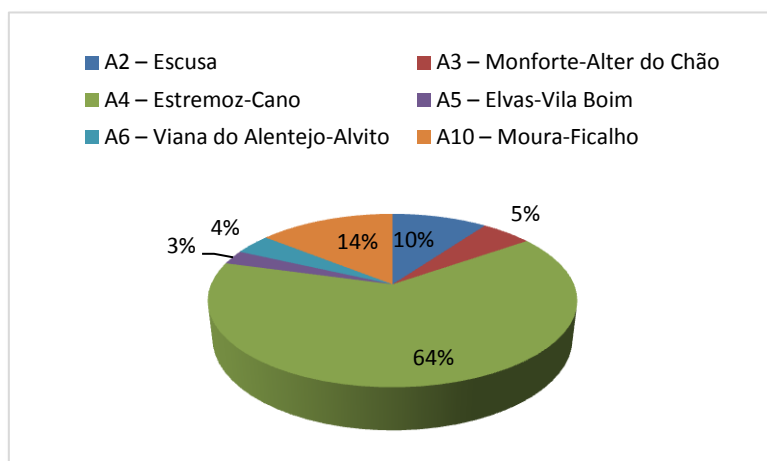


Figura 2.7 - Distribuição da percentagem de população servida pelos diferentes sistemas aquíferos carbonatados do Maciço Antigo.

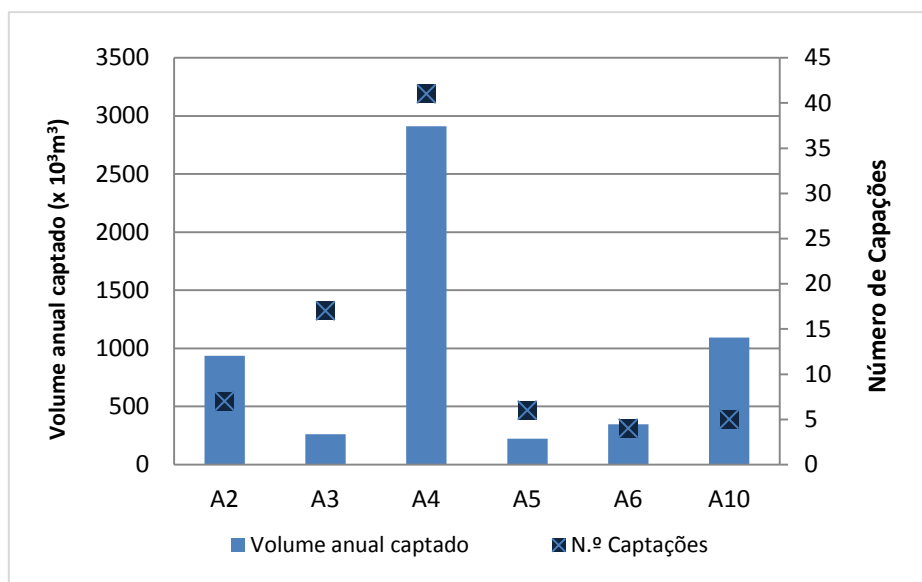


Figura 2.8 - Número de captações e volume captado pelos sistemas aquíferos carbonatados do Maciço Antigo.

No Maciço Antigo todos os sistemas aquíferos cársicos são utilizados para a captação de água para sistemas públicos confirmando assim a sua importância para as populações locais. É no aquífero A4 - Estremoz-Cano que se localiza a maioria das captações, o maior volume captado anualmente e é também este aquífero o que serve o maior número de pessoas.

2.2.3. Orla Ocidental

Na Tabela 2.5, Figura 2.9 e Figura 2.10 apresenta-se a distribuição da população servida, número de captações e volume anual captado das massas de água subterrânea das regiões carbonatadas.

Tabela 2.5 - Distribuição do n.º de captações, população servida e volume anual captado na Orla Ocidental nos sistemas aquíferos cársicos

Sistemas Aquíferos	N.º captações	População servida	Volume captado anualmente (10^3 m^3)
O3 – Cársico da Bairrada	9	73162	6959
O8 – Verride	2	2614	184
O9 – Penela-Tomar	10	11567	1233
O11 – Sicó-Alvaiázere	10	45075	4070
O20 – MCE	16	57643	5409
O24 – Cesareda	2	10219	577
O26 – Ota-Alenquer	2	158307	13769
O32 – Sines	13	17107	3269
Serra Boa Viagem*	1	--	--
TOTAL	65	375694	35470

*Dada a sua pequena importância não foi considerada como sistema aquífero autónomo.

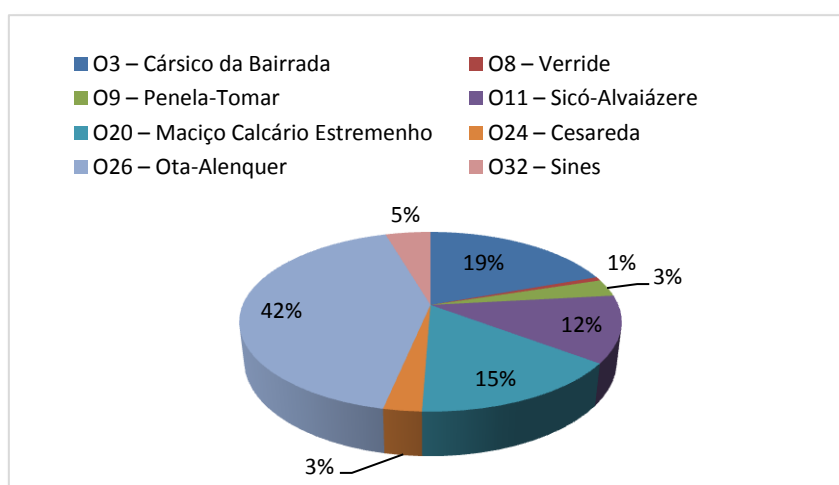


Figura 2.9 - Distribuição da percentagem de população servida pelos diferentes sistemas aquíferos carbonatados da Orla Ocidental.

Dos 11 aquíferos cársicos presentes na Orla Ocidental, 8 são objeto de exploração de água para o abastecimento público.

Das 194 captações só uma não se localiza nos aquíferos delimitados por Almeida et al (2000). Esta captação situa-se na Serra da Boa Viagem e atualmente o seu funcionamento é de “reserva”, por isso não se encontra projetada na Figura 2.9 e Figura 2.10.

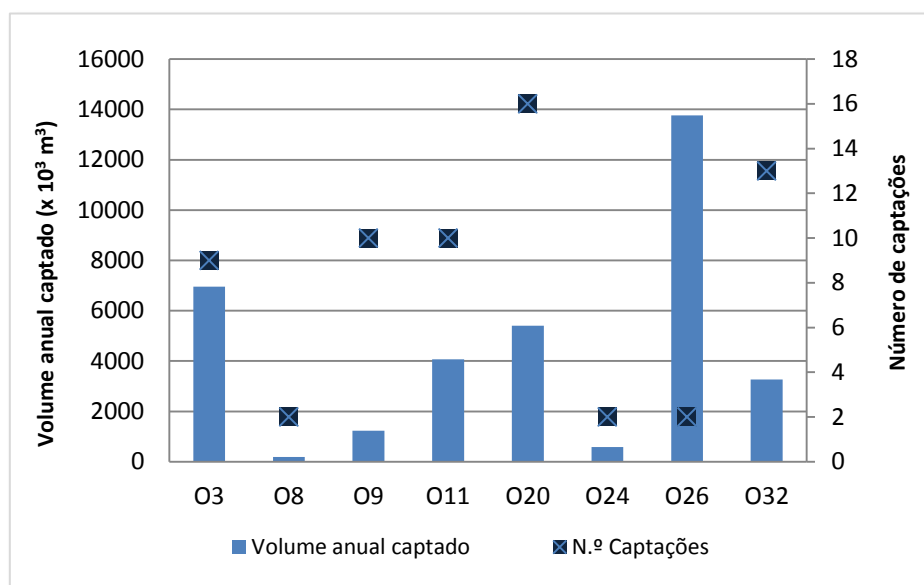


Figura 2.10 - Número de captações e volume captado pelos sistemas aquíferos carbonatados da Orla Ocidental.

O maior número de captações localiza-se no sistema O20 – Maciço Calcário Estremenho mas é no O26 – Ota-Alenquer onde se capta o maior volume de água anualmente e consequentemente apresenta a maior percentagem de população abastecida. É de referir também que o sistema O3 – Cársico da Bairrada é responsável pelo abastecimento de 19% da população e é onde é captado o 2º maior volume.

2.3. Considerações finais

No ano de 2008, no continente 34% da população era abastecida por água de origem subterrânea e desta água 16% é de origem cársica. Das 5615 captações de origem subterrânea cadastradas no INSAAR (2010), com dados de 2008, apenas 3% se localizam em maciços carbonatados (Tabela 2.1) e eram responsáveis por captar 21% da água subterrânea do País (Tabela 2.2). Estima-se que atualmente este valor deva rondar os 18%, devido ao facto das captações subterrâneas da Orla Meridional terem sido substituídas pelas captações de água superficial.

Fazendo uma análise à proveniência e distribuição da água dos aquíferos cársicos verificamos que o maior número de captações se situa no Maciço Antigo, mas que a maior percentagem de população abastecida assim como os volumes captados anualmente ocorrem na Orla Ocidental (Figura 2.8 e Figura 2.10, respetivamente).

Destacam-se o sistema aquífero A4-Estremoz-Cano, no Maciço Antigo e o O26 – Ota-Alenquer, na Orla Ocidental por serem os que captam um maior volume de água anualmente e abastecem a maior percentagem da população.

Na campanha do INSAAR (2010) as entidades gestoras de pequena dimensão e pequena expressão territorial (como são as Juntas de Freguesia ou pequenas associações locais) não foram

contabilizados para os dados anuais. Há alguns concelhos que se localizam parcialmente sobre regiões carbonatadas que não responderam aos inquéritos. Estudos futuros nesta temática devem ter em consideração estas situações de modo a obter um número mais próximo da realidade.

2.4. Referências bibliográficas

- Almeida, C. (1985). *Hidrogeologia do Algarve Central*. (Tese de Doutoramento), Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Almeida, C., & Crispim, J. A. (1987). Traçagens com uranina no Algar do Escarpão (Albufeira-Algarve). *ALGAR - Boletim da Sociedade Portuguesa de Espeleologia*, 1, 48.
- Almeida, C., Mendonça, J. J. L., Jesus, M. R., & Gomes, A. J. (2000). *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. Lisboa: Centro de Geologia da Universidade de Lisboa e Instituto da Água.
- Almeida, C. A., Silva, M. L., & Crispim, J. A. (1995). COST 65 – National Report for Portugal, Hydrogeological Aspects of Groundwater Protection in Karstic Areas, Final Report (EUR 16547 EN), 221-220.
- Crispim, J. A. (1982). *Morfologia Cárstica do Algarve*. (Estágio Científico), Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Crispim, J. A. (1987). *Os Lapiás do Carso do Algarve* (Publicação Especial n.º 8). Lisboa: Sociedade Portuguesa de Espeleologia.
- Crispim, J. A. (2007). Regiões cársticas de Portugal. *Livro de Resumos do Simpósio Ibero-americano sobre Património Geológico, Arqueológico e Mineiro em Regiões Cársticas.*, 1, 11.
- Crispim, J. A. (2008). *Património Geológico da Serra de Montejunto*. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Espeleologia.
- Crispim, J. A. (2010a). Aspectos relevantes do património cárstico da Orla Ocidental. *VIII Congresso Nacional de Geologia*, 18(4).
- Crispim, J. A. (2010b). Las Cuevas Turísticas de Portugal. In J. J. C. Durán, F. (Ed.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo* (pp. 323-334). Madrid: Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.
- Crispim, J. A., Lopes, L. M., Teixeira, E., Machado, J., & Monteiro, C. (2006). Experiências de traçagem da circulação subterrânea nas Terras do Risco (Sesimbra, Arrábida) *VII Congresso Nacional de Geologia* (pp. 541-544). Évora: Sociedade Geológica de Portugal & Universidade de Évora.
- Curtis, M. L. (1999). Structural and kinematic evolution of a Miocene to Recent sinistral restraining bend: the Montejunto massif, Portugal. *Journal Struct. Geol.*, 21, 39-54.
- Fernandes, L. F. P. (1992). *Hidrogeologia de Dois Importantes Aquíferos (Sabariz/Cova da Lua) do Maciço Polimetamórfico de Bragança*. (Tese de Mestrado), Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Gago, S. A. L. (2007). *Aquífero Querença Silves: um percurso hidrogeológico como recurso pedagógico para a educação ambiental*. (Tese de mestrado), Universidade do Algarve, Faro.
- Gutiérrez-Marco, J. C., Robardet, M., & Piçarra, J. M. (1998). Silurian stratigraphy and paleogeography of the Iberian Peninsula (Spain and Portugal). In J. C. Gutiérrez-Marco & I. Rábano (Eds.), *6th International Graptolite Conference (GWG-IPA) & 1998 Field Meeting of the International Subcommission on Silurian stratigraphy (ICS-IUGS)* (Vol. 23, pp. 13-38). Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.
- INSAAR. (2010). *Relatório do estado do abastecimento de água e da drenagem e tratamento de águas residuais, sistemas públicos urbanos - INSAAR 2009 (Dados 2008, Campanha 2009)*. Lisboa: INSAAR & INAG

- INSAAR. (2011). *Relatório do estado do abastecimento de água e da drenagem e tratamento de águas residuais, sistemas públicos urbanos - INSAAR 2010 (Dados 2009, Campanha 2010)*. Lisboa: INSAAR & INAG.
- Jesus, M. R. (1995). *Contaminação em aquíferos carbonatados na região de Lisboa-Sintra-Cascais*. (Tese de Mestrado), Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Kullberg, J. C., Rocha, R. B., Soares, A. F., Rey, J., Callapez, P., & Martins, L. (2006). A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. In R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha, & J. C. Kullberg (Eds.), *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria* (pp. 317-368). Évora: Universidade de Évora.
- Kullberg, M. C., Kullberg, J. C., & Terrinha, P. (2000). Tectónica da Cadeia da Arrábida. *Tectónica das regiões de Sintra e Arrábida. Memórias Geociências*. (Vol. 2, pp. 35-84). Lisboa: Museu Nacional História Natural da Universidade de Lisboa.
- Lauritzen. (2001). Marble stripe karst of the Scandinavina caledonides: an end-member in the contact karst spectrum. *Acta carsologica*, 30/2(3), 47-79.
- Lobo Ferreira, J. P., Oliveira, M., & Ciabatti, P. (1995). *Desenvolvimento de um inventário das águas subterrâneas em Portugal*. (Vol. 1). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Lopes, F. M. V. (2006). *Geologia e génese do relevo da Rocha da Pena (Algarve, Portugal) e o seu enquadramento educativo*. (Tese de Mestrado), Universidade do Algarve, Faro.
- Mendonça, J. L. (2013). As águas subterrâneas e o abastecimento de água a Lisboa no século XX. 9^o *Seminário sobre Águas Subterrâneas*. (pp. 114-117). Campus da Caparica: APRH & FCT-UNL.
- NECA. (2005). *Sistema Cárstico do Frade - O fantástico mundo oculto dos minerais*. Sesimbra: Norprint.
- Pereira, E., Pereira, D. Í., Rodrigues, J. F., Ribeiro, A., Noronha, F., Ferreira, N., Sá, C. M., Ramos, J. M. F., Moreira, A. & Oliveira, A. F. (2006). *Notícia explicativa da Folha 2 da Carta Geológica de Portugal na escala 1/200 000*. Lisboa: Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação.
- Ribeiro, A., Antunes, M. T., Ferreira, M. P., Rocha, R. B., Soares, A. F., Zbyszewski, G., Almeida, F. M., Carvalho, D., Monteiro, D. (1979). *Introduction à la Géologie Générale du Portugal*. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.
- Santos, M. F. (1964). Vestígios de pinturas rupestres descobertos na Gruta do Escoural. *O Arqueólogo Português*, 5, 5-47.
- Terrinha, P., Rocha, R. B., Rey, J., Cachão, M., Moura, D., Roque, C., Martins, L., Valadares, V., Cabral, J., Azevedo, M.R., Barbero, L., Clavijo, E., Dias, R.P., Matias, H., Madeira, J., Silva, C.M., Minhá, J., Rebelo, L., Ribeiro, C., Vicente, J., Noiva, J., Youbi, N. & Bensalah, M. K. (2013). A Bacia do Algarve: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. In R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha, & J. C. Kullberg (Eds.), *Geologia de Portugal* (Vol. Volume II - Geologia Meso-cenozóica de Portugal, pp. 9-28). Lisboa: Escolar Editora.
- Teixeira, C. (1981). *Geologia de Portugal. Vol. I - Precâmbrico, Paleozóico*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkianra.

Capítulo 3. Investigação Espeleológica

A investigação espeleológica tem como objeto de estudo as cavidades suficientemente largas que permitem a entrada do homem, fornecendo informações valiosas ao estudo da hidrogeologia das regiões cársticas. Aqui pretende-se expor a evolução do pensamento sobre o escoamento destas regiões. As técnicas, que de algum modo são do domínio da espeleologia e que contribuem para o conhecimento do escoamento, também são aqui apresentadas.

3.1. A evolução histórica do conhecimento espeleológico e a sua contribuição nos estudos hidrogeológicos

3.1.1. No mundo

Ao longo dos séculos, em vários momentos ocorreram impulsos no estudo dos meios cársticos. Segundo Ford & Williams (2007), os conceitos sobre a circulação de água nestes meios foram formulados antes de Cristo, por Thales, Aristóteles e Lucrecio, ideias que permaneceram até ao século XVII, quando se compreenderam as relações entre a evaporação, a infiltração e o escoamento num rio. Nesse mesmo século, o estudo das grutas de uma forma sistemática deu grandes passos quer na China, com Xu Xiake, quer na Europa com Kircher e Valvasor. Xu Xiake, também conhecido por Xu Hongzu (1587-1641), geógrafo que estudou o carso da China durante 30 anos, descreveu as suas jornadas na obra composta por vários volumes “As viagens de Xu Xiake”. Dedicou muito do seu tempo ao mundo subterrâneo, localizando e topografando cavidades, descrevendo os espeleotemas, os rios subterrâneos e lagos aí existentes. Foi o primeiro a descrever métodos de progressão e exploração em gruta e visitou mais de 300 cavidades (Sweeting, 1995; Ravbar, 2003). Na Europa, em 1665 é publicada a obra do Padre Anastasio Kircher, *Mundus Subterraneus*, reunindo nos seus dois volumes diferentes teorias sobre a formação das grutas baseadas em várias obras e lendas. No

último quartel do século XVII, o barão Johann Valvasor visita e explora cerca de sete dezenas de cavidades na região cárstica da Eslovénia, escrevendo e publicando meticolosas informações sobre as suas descobertas, estudando e explorando sistematicamente a circulação da água subterrânea (Forti, 2004).

A segunda metade do século XIX foi bastante importante para a compreensão das formas exocársticas, com os trabalhos de Prestwich e Miall na Grã-Bretanha e Heim, Chairx e Kckert no continente europeu, entre outros (Ford & Williams, 2007), mas foram os trabalhos do geógrafo sérvio, Jovan Cvijić que deram a verdadeira contribuição à compreensão destas formas. Com o seu trabalho *Das Karstphänomen* de 1893, lançou as fundações das ideias modernas da geomorfologia cárstica, a todas as escalas, desde os lapiás aos poljes (Ford & Williams, 2007). É no final do século XIX, início do século XX que são formuladas as teorias para a circulação de água nos meios cársticos, sendo as mais conhecidas as de Grund, Katzer e Cvijić. Em 1903, Grund propõe que a circulação de água nos terrenos cársticos é regionalmente controlada pelo nível médio das águas do mar (Figura 3.1).

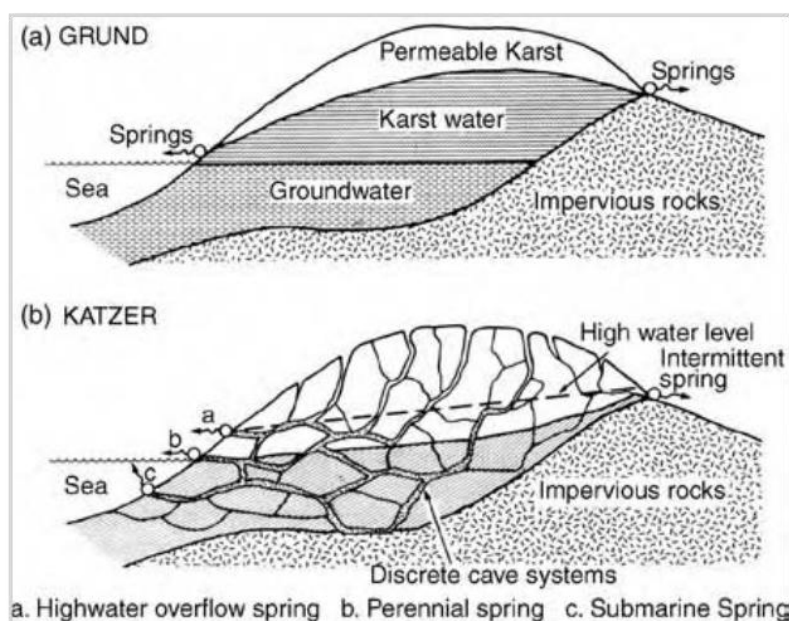


Figura 3.1 - (a) Sistema de circulação de água subterrânea de acordo com Grund (1903), na qual a água se encontra estagnada abaixo do nível das águas do mar. (b) Sistema de circulação de água subterrânea de acordo com Katzer (1909), na qual a água circula essencialmente por rios subterrâneos e independentes entre si.

Considera que apenas a água na zona saturada e acima do nível das águas do mar circula (*Karstwasser*) e que a água abaixo do nível do mar está estagnada (*Grundwasser*). Grund assume assim que a superfície superior acompanha a evolução da recarga, pelo que os eventos de maior pluviosidade inundariam as zonas mais baixas, como por exemplo os poljes. No entanto a falta de sincronização na inundação dos poljes à mesma altitude foi o argumento utilizado na altura para a não aceitação desta teoria (Milanović, 2004; Ford & Williams, 2007). Por sua vez, Katzer em 1909

observou que entre nascentes a diferentes altitudes, a nascente que se encontra à cota mais alta não é necessariamente a que seca primeiro e também observou que a resposta das nascentes às precipitações é bastante imprevisível. Katzer foi bastante influenciado pelos trabalhos do espeleólogo francês Martel, considerado por muitos, o pai da espeleologia moderna. A obra de Martel sobre a espeleologia, hidrogeologia e geologia é bastante vasta contando com mais de 1000 publicações (Felizardo, 2010). Só entre os anos de 1888 e 1893 explorou mais de 230 grutas, totalizando 50 km de galerias. Em junho de 1888 realizou uma expedição ao sul de França onde navegou no rio subterrâneo de Bramabiau mais de 700 metros (Felizardo, 2010). Com as observações de Martel, e também de Schmidt que explorou a rede de galerias do rio Piuka (Trieste), Katzer assumiu que a circulação da água seria essencialmente por rios subterrâneos com redes de drenagem independentes (Figura 3.1) com diferentes níveis de água e com diferentes reações à recarga. O seu trabalho representa uma importante cooperação entre a hidrogeologia e a espeleologia (Milanović, 2004; Ford & Williams, 2007). Cvijić publicou em 1918 o resultado do amadurecimento das suas ideias relativamente à circulação de água subterrânea e a sua relação com a morfologia cársica. Acreditava num nível de água descontínuo, controlado pela litologia e pela estrutura, dividindo então os maciços em três zonas: zona seca, zona de transição e zona saturada com permanente circulação de água.

Durante a primeira metade do século XX emergiram outras três teorias, conflituosas entre si, que apresentam as ideias para a génese das grutas e a sua relação com o nível de água (Figura 3.2).

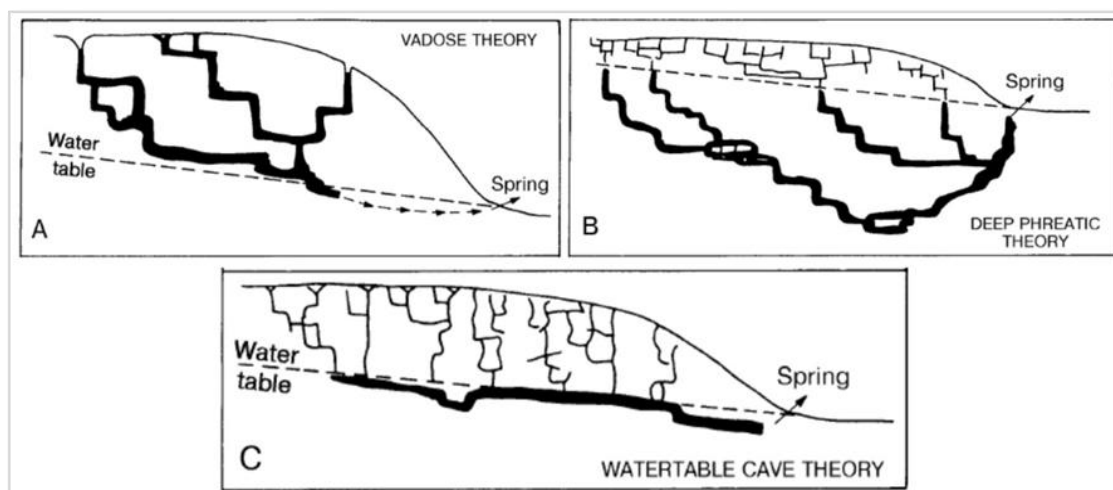


Figura 3.2 - Diagrama esquemático da génese de grutas: A – Teoria da espeleogénese vadosa (Vadose Theory: Dwerryhouse, 1907; Martel, 1921); B – Teoria da espeleogénese freática profunda (Deep Phreatic Theory: Davis, 1930, 1931; Bretz, 1942); C – Teoria da espeleogénese na superfície freática (Watertable Cave Theory: Swinnerton, 1932; Rhoades & Sinacori, 1941). (in: Ford, 1999).

A Figura 3.2-A representa o modelo que defende a génese das grutas num ambiente vadoso. Esta hipótese não foi explicitamente apresentada em nenhum trabalho (Ford, 1999), mas encontra-se

implícito nos trabalhos de Dwerryhouse (1907) e Martel (1921). Este modelo defende que o nível de água já se encontra estabilizado em profundidade antes da génese da gruta, com o apoio de alguns fatores externos, nomeadamente o entalhamento de uma linha de água ou a existência de um substrato impermeável. É importante recordar que quando se estabeleceu esta hipótese, não era conhecido o papel do CO_2 do solo na dissolução do calcário (apresentado no trabalho de Adams & Swinnerton, 1937), conhecendo-se apenas a dissolução do calcário através do CO_2 atmosférico, acreditando-se que seria suficiente para alargar as fissuras da zona vadosa. Em 1930, Davis utilizou evidências empíricas das topografias, secções e descrições das grutas para argumentar que muitas galerias tinham-se desenvolvido lentamente e aleatoriamente abaixo do nível de água regional, com um escoamento característico das leis de Darcy (Davis, 1930, 1931; Bretz, 1942) (Figura 3.2-B).

A teoria de que a génese das cavidades decorria na dependência do nível de água (Figura 3.2-C) foi defendida por Swinnerton (1932) e Rhoades & Sinacori (1941). Nessa altura, o papel do CO_2 do solo na dissolução do calcário já começava a ser conhecido. Esta hipótese tem em comum com as teorias anteriores o facto de defender que o nível de água já se encontrava estabilizado aquando a génese das grutas.

Este conflito de ideias foi ultrapassado com o modelo dos “Quatro Estados” (*Four State Model*), apresentado por Ford (1971) e Ford & Ewers (1978). O modelo baseia-se na maior ou menor frequência com que as fraturas e os planos de estratificação, penetráveis pela água, ocorrem no maciço. Assim, foi possível elaborar quatro situações distintas onde se observa a relação entre o nível freático e o nível de água com o desenvolvimento da gruta (Figura 3.3). A interseção entre as fraturas do maciço rochoso e os planos de estratificação são zonas de fraqueza que podem ser aproveitadas pela água. Estas zonas geralmente fazem ângulos apertados, conhecidos como *loop*, que em corte se podem assemelhar a um cotovelo.

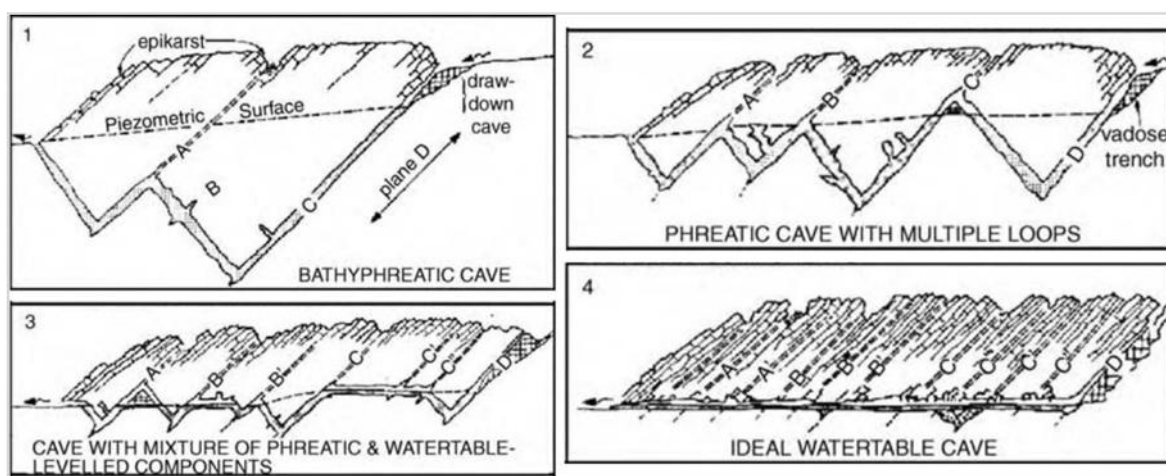


Figura 3.3 - Modelo dos “Quatro Estados” sobre o perfil de uma gruta freática. (in: Ford, 1971).

O estado 1 (Gruta batifreática - *Bathypheatic Cave*) representa um maciço pouco fraturado onde se desenvolverá galerias freáticas, na zona batifreática. A informação atual sobre este sistema de grutas é bastante incompleta, pelo facto de as galerias batifreáticas serem de difícil exploração. Quando a drenagem nestas galerias é abandonada, muitas vezes encontram-se obstruídas por sedimentos na parte inferior dos cotovelos. Não se sabe a profundidade máxima das galerias batifreáticas, sabendo-se apenas que a nascente *Vaucluse* (França) tem mais de 300 m de profundidade, explorada com auxílio de um robot (Ford & Williams, 2007). O estado 2 (Gruta freática com numerosos cotovelos - *Phreatic Cave with Multiple Loop*) ocorre quando a frequência de fissuras é elevada e o nível piezométrico estabelece a altitude dos cotovelos a uma cota mais alta. Enquanto o sistema não se desenvolve, o nível de água é elevado. Quando este alarga, o volume disponível é maior, fazendo com que o nível de água desça, ficando a água retida entre os cotovelos. As grutas de *Hölloch* e de *Siebenhengste* (Suíça) são exemplo deste estado (Ford & Williams, 2007).

Grutas que são uma mistura de cotovelos baixos e galerias quase horizontais são representativos do terceiro estado (Gruta com combinação de elementos freáticos e de superfície freática - *Cave with Mixture of Phreatic & watertable*), com elevada frequência de fissuras e uma diminuição da resistência do maciço rochoso. Um dos exemplo deste estado é o sistema Swildon's–Wookey Hole (Inglaterra) onde através de mergulho foi possível ultrapassar 11 cotovelos freáticos (Hanwell et al., 2010). No estado 4 (Gruta ideal de superfície freática - *Ideal watertable Cave*) a frequência da fraturação é tão elevada ou a resistência do maciço rochoso é tão baixa que permite a absorção de todo o escoamento à superfície e observa-se um gradiente hidráulico muito baixo. A gruta tende a não ter grandes declives e a presença de tetos baixos é muito comum. Alguns exemplos no sudoeste asiático (China, Vietname, Malásia, entre outros) são descritos como pertencendo a este estado. A *Cocklebidy Cave* (Austrália) é um exemplo onde foi mergulhado ao longo do nível de água por mais de 6,5 km (Finlayson & Hamilton-Smith, 2003). A diferenciação que o modelo dos quatro estados faz da zona freática e do nível de água, como se pode observar na Figura 3.3, é uma simplificação e uma idealização da realidade. A gruta pode conter traços dos vários estados, de acordo com as características do aquífero (Ford & Williams, 2007).

3.1.2. Em Portugal

As primeiras referências associadas ao estudo geológico, geomorfológico e hidrogeológico das regiões calcárias são do início do séc. XX, com Fleury (1917, 1940). A este autor não lhe foram indiferentes os campos de lapíás típicos de algumas regiões cársicas portuguesas, mas dedicou grande parte do seu esforço na investigação dos aspetos da circulação das águas na bacia de alimentação das nascentes do Alviela e medidas de proteção. O trabalho de Fernandes Martins (1949) sobre o Maciço Calcário Estremenho foi um marco de referência que perdurou sem sucessor

durante cerca de meio século. Movido pelo seu interesse na biospeleologia, Machado & Machado (1948) forneceram a primeira referência abrangente sobre a distribuição das grutas em Portugal, e os trabalhos de Soares & Conde (1956) e Soares et al., (1957), que puseram a tónica nos aspetos morfológicos e geológicos das grutas. Dissertações sobre a morfologia e hidrogeologia cársica foram publicadas no final do século XX e início do século XXI sobre as principais áreas calcárias portuguesas, nomeadamente: Almeida (1985), Cunha (1990), Crispim (1995), Rodrigues (1998), Monteiro (2001) e Costa (2008). As associações de espeleologia nacionais têm dado o seu contributo na divulgação do património espeleológico português, nomeadamente a Sociedade Portuguesa de Espeleologia (SPE) que é a pioneira, desde 1948, da espeleologia organizada em Portugal e tem contribuído de forma sistemática e contínua para a divulgação dos estudos sobre as nossas regiões cárnicas (Crispim, 2010c). Os artigos científicos em revistas e conferências: Canais & Fernandes (1999); NECA (2005); Brilha et al., (2005), Cunha et al., (2008), Crispim (2010b), Brandão (2009), Cunha & Dimuccio (2014) e Calçada & Crispim (2014) e artigos dispersos em sítios de internet têm contribuído para a divulgação do património espeleológico. Parecerias com universidades, empresas públicas ou privadas têm de alguma forma financiado algumas explorações nacionais na investigação em grutas portuguesas.

3.2. A importância das grutas para o estudo do escoamento

A *Union Internationale de Spéléologie* (UIS) define gruta como uma abertura natural na rocha com tamanho suficiente para permitir a entrada do homem. Por sua vez, Ford & Williams (2007) definem gruta cársica (*karst cave*) como uma abertura alargada pela dissolução da rocha desde que esta apresente um diâmetro superior a 5-15 mm ou então que permita o escoamento turbulento da água. As grutas, de entre todas as formas cárnicas, são das mais complexas (Ford & Williams, 2007). Essa complexidade, que se traduz na organização, extensão e forma da cavidade, deve-se a vários fatores: litologia, tectónica, as condições climáticas, bióticas e pedológicas e ainda a posição do nível freático. Nas condutas a condutividade hidráulica é várias ordens de grandeza superior à condutividade hidráulica na matriz, pelo que a identificação da geometria da rede de galerias é essencial para compreender a direção de escoamento e um dos objetivos preponderantes na investigação hidrogeológica dos sistemas cárnicos (Jeannin et al, 2007).

Podem ser distinguidos três tipos de sistemas de galerias. A “rede de galerias espeleológicas” compreende o comprimento total de galerias exploradas pelos espeleólogos. Num carso maduro, a densidade destas galerias pode chegar a 10 - 15 km/km² (Worthington, 1991). Segundo Ford & Williams (2007) a “rede de galerias cárnicas” corresponde ao total de galerias existentes com mais de 1 cm de diâmetro, e para estas a densidade esperada é da ordem de algumas centenas km/km².

Assim as galerias acessíveis ao espeleólogo representam uma pequena fração no universo de todas as galerias cársticas.

A rede de galerias de uma gruta é composta por galerias onde não ocorre escoamento (fósseis) e por galerias freáticas ou ativas, sendo estas últimas as que contribuem para a compreensão do escoamento atual do sistema, as “*flowing conduit network*”. A estimativa de densidade destas galerias, com base em observações espeleológicas, é da ordem de 2 a 15 km/km² (Jeannin et al., 2007). Estes autores referem que a rede de galerias espeleológicas pode não corresponder às galerias com interesse hidrogeológico (*flowing conduit network*). Assim as observações feitas em determinadas grutas podem não ser representativas do restante sistema, pelo que se deve ter cuidado com as extrapolações.

Algumas metodologias para o estudo do escoamento cárstico podem ser aplicadas diretamente no interior das grutas (p. e. testes de traçagens) mas existem algumas metodologias que são de exclusiva aplicação em grutas (exploração e topografia das galerias vadasas e das galerias freáticas, medição do gotejo da água e análise dos sedimentos da gruta).

3.2.1. Exploração e Topografia

A determinação da extensão lateral e vertical de uma cavidade é possível através da sua exploração e respetiva topografia. Munidos de alguns equipamentos e metodologias, os espeleólogos registam informações desde de comprimento, largura e direções das galerias e poços da gruta, assim como alguns pormenores dos seus preenchimentos. O erro associado a este tipo de topografia, em condições excecionais, pode ser na ordem de 1%, embora se observe com alguma frequência erros na ordem dos 5-10%. Para trabalhos de maior precisão, por exemplo na implantação de um furo, este tipo de topografia não é a mais apropriada. A utilização de teodolitos, cujos erros podem ser de 0,1% a 0,01%, é uma das opções a ter em consideração. Os sistemas de posição eletromagnéticos também se revelaram muito úteis (Jeannin et al., 2007).

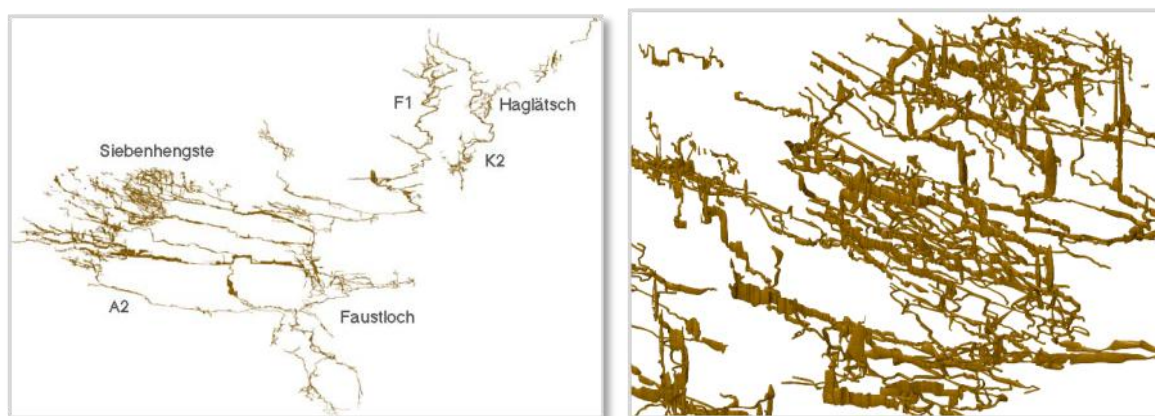


Figura 3.4 - Na figura da esquerda pode-se observar o sistema Siebenhengste-Hohgant (Suiça) em 3D e à direita uma ampliação da mesma gruta (in: Heller & Neumann, 2001).

Vários programas de computador têm sido produzidos para processar todos os dados recolhidos aquando a topografia para posterior produção planimétrica em *softwares* livres, p. e. *Visual Topo* ou o *Compass*. Estes programas usam relações trigonométricas para converter as coordenadas polares dos dados em coordenadas cartesianas tridimensionais. Estes programas conseguem assim mostrar a planta da gruta, o corte longitudinal e ainda uma vista em 3D. Possibilita ainda a exportação dos dados para programas de sistemas de informação geográficas (SIG) permitindo gerir, analisar e visualizar os dados retirando muito mais informação (Figura 3.4).

Novas técnicas de visualização das topografias começaram a ser desenvolvidas no final do século XX e ainda continuam a dar passos largos. O *laser scanner* e o computador com visualização a 3D torna possível representarem a gruta tridimensionalmente com um elevado grau de precisão. Com o *3-D Scanner* a laser a gruta é digitalizada a partir de vários pontos permitindo topografar ou desenhar as paredes com milímetros de precisão (Figura 3.5). Fotografias das paredes são projetadas sobre essas superfícies virtuais reproduzindo a gruta de uma forma quase real. Atualmente esta técnica requiere meios técnicos especializados pelo que algumas empresas privadas têm operado no meio, p.e. a Geolink3D ou a Geomagic. Alguns trabalhos um pouco mais académicos também têm dado o seu contributo (Roncat et al., 2011; Cosso et al., 2014), como também os portugueses (Silvestre et al., 2012, 2015). Esta técnica é utilizada preferencialmente em salas amplas e de fácil acesso.

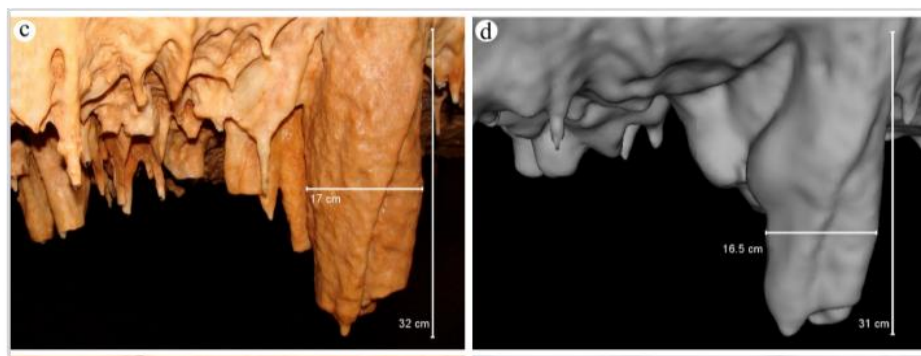


Figura 3.5 - Exemplo de um conjunto de estalagmites reais e a sua visualização utilizando 3D Scanners a laser. (in: Silvestre et al., 2015)

3.2.2. Implantação de um furo numa galeria freática

A construção de um furo que intersete uma galeria freática é um objetivo com elevado grau de insucesso devido à grande heterogeneidade dos meios em questão. A execução de um piezómetro, à superfície, que intersete uma galeria freática é o ideal para a colheita amostras para controlo da qualidade da água do aquífero, sem referir o possível aproveitamento para consumo público. A topografia muitas vezes não tem precisão suficiente para a implantação daqueles dispositivos pelo que é frequente recorrer-se ao *radio location*, onde se coloca um emissor no interior da gruta e um recetor à superfície para determinar o ponto na vertical (p.e. Farrant & Mullan, 2008). Para cavidades

relativamente perto da superfície, o erro desta metodologia é de 0,5 a 1% (Jeannin et al., 2007). Quando o objetivo é o de intercepar uma galeria que não é acessível ao homem as várias metodologias no domínio da geofísica são a opção a escolher. Mais informações no *Capítulo 4 - Métodos Geofísicos*, mas é de ter presente que não existem métodos geofísicos que consigam detetar galerias abaixo dos 20-30 de profundidade, salvo galerias de grande volume (Jeannin et al., 2007).

Em Portugal continental algumas captações para abastecido público localizam-se em aquíferos cárlicos. Mendes de Sousa (1964), Paradela & Zbyszewski (1971) e Peixinho de Cristo (1988) apresentam uma compilação dos trabalhos desenvolvidos para o aproveitamento de água nos aquíferos calcários portugueses. A captação do Olho de Mira que ainda hoje abastece a vila e parte do concelho de Porto de Mós é um caso sucesso (Paradela, 1971). O facto de o Eng.º Lopes Paradela ser sócio da Sociedade Portuguesa de Espeleologia (SPE) talvez tenha facilitado o recurso a mergulhadores ("*homens rã*", como lhes chama, Álvaro Vilar Moreira e Jorge Terra, também em diferentes momentos associados da SPE) que seguiram o traçado da galeria inundada até onde foi possível com as técnicas da época. Em conjunto com o método geofísico eletromagnético esses trabalhos foram fundamentais para que o poço se situasse o mais perto possível da galeria natural inundada. A gruta dos Moinhos Velhos, também em Mira de Aire, é outro exemplo de tentativa de posicionar um furo para intersepar galeria freática, realizado pela Sociedade Portuguesa de Espeleologia em 1990 (Crispim et al., 2014).

3.2.3. Génese e evolução das redes de galerias

Por vezes é importante compreender a evolução do sistema cársico ao longo do tempo, identificando as antigas galerias freáticas, possivelmente noutras condições climáticas, agora inativas (Jeannin et al., 2007). Normalmente, o sistema de grutas resulta de uma sucessão de rede de galerias ativas que vão evoluindo com o tempo. Nas áreas montanhosas, onde estas condições estejam reunidas, as galerias ativas situam-se normalmente perto da base dos vales. Assim, à medida que o vale vai entalhando, as galerias situadas a cotas superiores acabam por ser abandonadas e passam a ter a designação de fósseis. Este modelo pode ser mais complexo caso, no passado, por qualquer motivo, tenha ocorrido uma subida do nível e as galerias fósseis tenham sido reativadas (Audra et al., 2004). Observações da morfologia das galerias, tipo e direção de escoamento, vagas de erosão e sedimentos podem tornar possível reconstruir em detalhe as condições de escoamento que predominaram na rede de galerias aquando a sua génese durante longos períodos (Ford & Williams, 2007; White, 2007 ou Fairchild et al., 2007). É possível distinguir vários sub-sistemas de escoamento e datá-los através dos espeleotemas (U-Th) ou com termoluminescência dos grãos de quartzo (Al-Be). Um exemplo é o trabalho de Hauselmann (2002) onde a espeleogénese do sistema

Siebenhengste-Hohgant (Suíça) foi descrita e datada, através de informações sobre o aprofundamento do vale, avanços e recuos do glaciário, e a consequente adaptação do escoamento na gruta. Nas cavidades situadas no Polje de Minde e Alvados e área envolvente (Maciço Calcário Estremenho) existem alguns trabalhos nos quais a temática da espeleogénese, nomeadamente a datação de sedimentos, foi elaborada por Crispim (1987, 1995, 2009). De uma forma mais pontual, outros trabalhos foram publicados, nomeadamente a espeleogénese do Algar do Vale da Ponte (Caetano & Simões, 1987; Rodrigues, 2011), datação de espeleotemas e, mais recentemente, a variação magnética nos espeleotemas com vista a observações paleo-ambientais (Crispim & Ford, 1992; Crispim (2010a); Veiga-Pires et al., 2011; Font et al., 2014).

Há autores que defendem que partir do padrão das galerias de uma rede espeleológica é possível interpretar as condições de recarga durante a génese da cavidade e qual o tipo de porosidade predominante (Palmer, 1991). A análise da morfologia das galerias (secção das galerias) permite caracterizar as condições de escoamento no passado e no presente e encontra-se bem documentada na bibliografia (p.e. Ford & Williams, 2007). A partir da morfologia das galerias e poços é possível determinar o tipo de escoamento que lhe deu origem. Os poços são característicos da zona vadosa devido ao alargamento de fraturas pelo cair da água em cascata. Meandros entalhados são um exemplo de galerias altas e estreitas escavadas pelas águas que circulam em regime vadoso. As galerias freáticas apresentam uma secção circular ou elíptica alongada segundo um eixo, horizontal, vertical ou oblíquo que se formam na zona freática ou epifreática. Nas galerias freáticas, as secções são frequentemente constantes ao longo dos alinhamentos principais de escoamento. (Jeannin et al., 2007).

3.3. Referências bibliográficas

- Adams, C., & Swinnerton, A. C. (1937). The solubility of calcium carbonate *Transactions, American Geophysical Union* 11(2), 504-508.
- Almeida, C. (1985). *Hidrogeologia do Algarve Central*. (Tese de Doutoramento), Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Audra, P., Mocochain, L., Camus, H., Gilli, E., Clauzon, G., & Bigot, J. (2004). The effect of the Messinian Deep Stage on karst development around the Mediterranean Sea. Examples from Southern France. . *Geodinamica Acta*, 17(6), 389-400. doi:10.3166/ga.17.389-400
- Brandão, J. M. (2009). Grutas turísticas: património, emoções e sustentabilidade. *Geonovas*, 22, 35-43.
- Brilha, J. B., Andrade, C., Azerêdo, A., Barriga, F., Cachão, M., Couto, H., Cunha, P. P., Crispim, J. A., Dantas, P., Duarte, L. V., Freitas, M., Granja, M. H., Henriques, M. H., Henriques, P., Lopes, L., Madeira, J., Matos, J. M. X., Noronha, F., Pais, J., Piçarra, J., Ramalho, M., Relvas, J., Ribeiro, A., Santos, A., Santos, V., & Terrinha, P. (2005). Definition of the Portuguese frameworks with international relevance as an input for the European geological heritage characterisation. *Episodes*, 28(3), 177-186.

-
- Bretz, J. H. (1942). Vadose and phreatic features of limestone caverns *Journal of Geology* 50, 675-811.
- Caetano, P., & Simões, M. (1987). Algar do Vale da Ponte. *Algarcho*(10), 10-11.
- Calçada, I., & Crispim, J. A. (2014). Grutas turísticas e divulgação do património espeleológico em Portugal: o caso do Programa Geologia no Verão. In J. M. Calaforra & J. J. Durán (Eds.), *Cuevatur. Primer Congreso Iberoamericano y Quinto Congreso Español sobre Cuevas Turísticas* (Vol. 1. Turismo subterráneo, pp. 89-100). Aracena: Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.
- Canais, F., & Fernandes, J. (1999). *Lapas e algares da Serra de Santo António*. Torres Novas: Subterra: Grupo de Espeleologia.
- Cosso, T., Ferrando, I., & Orlando, A. (2014). Surveying and mapping a cave using 3D laser scanner: the open challenge with free and open source software *ISPRS Technical Commission V Symposium* (Vol. XL-5, pp. 181-186). Riva del Garda, Italy: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.
- Costa, A. (2008). *Modelação matemática dos recursos hídricos subterrâneos da região de Moura*. (Tese de Doutoramento), Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Crispim, J. A. (1987). Evolução da hidrologia subterrânea na Gruta de Moinhos Velhos (Mira de Aire). *Algar - Boletim da Sociedade Portuguesa de Espeleologia*(1), 3-8.
- Crispim, J. A. (1995). *Dinâmica cársica e implicações ambientais nas depressões de Alvados e Minde*. (Tese de Doutoramento), Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Crispim, J. A. (2009). Evolution of portuguese karst regions in a basin-inversion setting: importance of faulting and confinement on cave development and spring locations. In W. White (Ed.), *15th International Congress of Speleology* (Vol. 2, pp. 819-824). Kerrville (Texas): International Union of Speleology.
- Crispim, J. A. (2010a). Grutas, estalagmites e paleoclimas. *Geonovas*, 23-24, 53-55.
- Crispim, J. A. (2010b). Las Cuevas Turísticas de Portugal. In J. J. C. Durán, F. (Ed.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo* (pp. 323-334). Madrid: Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.
- Crispim, J. A. (2010c). Panorama das regiões cársicas de Portugal. In J. M. Cotelos Neiva, A. Ribeiro, V. Mendes, F. Noronha, & M. Ramalho (Eds.), *Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História* (Vol. I, pp. 469-478). Lisboa: Associação Portuguesa de Geólogos & Sociedade Geológica de Portugal
- Crispim, J. A., Constantino, R., & Duarte, J. (2014). Espeleomergulho nas Grutas de Mira de Aire: importância para o conhecimento da rede espeleológica, a captação de água subterrânea e a divulgação das grutas turísticas. In J. M. Calaforra & J. J. Durán (Eds.), *Cuevatur. Primer Congreso Iberoamericano y Quinto Congreso Español sobre Cuevas Turísticas* (Vol. 4. Geoespeleologia, pp. 371-378). Aracena: Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.
- Crispim, J. A., & Ford, D. (1992). Primeiras datações de mantos estalagmíticos de uma gruta portuguesa pelo método das séries de urânio. *Algar - Boletim da Sociedade Portuguesa de Espeleologia*(3), 3-8.
- Cunha, L. (1990). *As serras calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaiázere*. Coimbra: Instituto Nacional de Investigação Científica.
- Cunha, L., & Dimuccio, L. (2014). Formas e processos cársicos nos maciços calcários do centro de Portugal. O caso particular do maciço de Sicó. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15(4), 673-685.
-

- Cunha, L., Dimuccio, L. A., & Leal, C. (2008). Formas e depósitos fluviais na Gruta Soprador do Carvalho (Maciço de Sicó - Portugal): uma primeira abordagem. In A. P. d. Geomorfologia (Ed.), *IV Congresso Nacional de Geomorfologia* (Vol. Eixo temático - E). Braga: Associação Portuguesa de Geomorfologia.
- Davis, W. M. (1931). The origin of limestone caverns *Science*, 73, 327-333.
- Davis, W. N. (1930). Origin of limestone caverns. *Geological Society of America, Bulletin* 41, 475-628.
- Dwerryhouse, A. R. (1907). Limestone caverns and potholes and their mode of origin. *Yorkshire Ramblers Club Journal*, 2(7), 223-228.
- Fairchild, I. J., Frisia, S., Borsato, A., & Tooth, A. F. (2007). Speleothems. In D. J. Nash & S. J. McLaren (Eds.), *Geochemical Sediments and Landscapes* (Vol. 7, pp. 200-245). Oxford: Blackwell.
- Farrant, A. R., & Mullan, G. J. (2008). Novel use of radio-location for a ground investigation at Pen Park Hole, Bristol, UK. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 41(3), 333-338. doi:10.1144/1470-9236/07-202
- Felizardo, A. (2010). *Cavernas em foco: Espeologia Histórica e Cultural Mundial* (Vol. 1). São Paulo: União Latinoamericana de Espeologia.
- Fernandes Martins, A. (1949). *Maciço Calcário Estremenho – Contribuição para um estudo de Geografia Física* (Tese de Doutoramento), Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Finlayson, B., & Hamilton-Smith, E. (2003). *Beneath the Surface: a Natural History of Australian Caves* (B. Finlayson & E. Hamilton-Smith Eds.). Sydney: UNSW Press.
- Fleury, E. (1917). Les lapiés des calcaires au Nord du Tage. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, 12, 127-274.
- Fleury, E. (1940). Les eaux du groupe de l'Alviela ou des grandes résurgences des calcaires jurassiques des Olhos d'Água, d'Ota et d'Alenquer. *Relatório sobre o tratamento de águas de Lisboa* (Vol. Anexo IV, pp. 129-191). Lisboa: M.O.P.C.
- Font, E., Veiga-Pires, C., Pozo, M., Carvallo, C., de Siqueira Neto, A. C., Camps, P., Mirão, J. (2014). Magnetic fingerprint of southern Portuguese speleothems and implications for paleo- and environmental magnetism. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*. doi:10.1002/2014JB011381
- Ford, D. C. (1971). Geologic structure and a new explanation of limestone cavern genesis *Cave Research Group of Great Britain Transactions* 13 (2), 81-94.
- Ford, D. C. (1999). Perspectives in karst hydrogeology and cavern genesis. In A. N. Palmer, M. V. Palmer, & I. D. Sasowsky (Eds.), *Karst Modeling: Special Publication 5* (pp. 17-29). Charles Town, West Virginia (USA): The karst Waters Institute.
- Ford, D. C., & Ewers, R. O. (1978). The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth. *International Journal Speleology*, 10, 213-244.
- Ford, D., & Williams, P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. West Sussex: Wiley & Sons.
- Forti, P. (2004). Books on caving. In J. Gunn (Ed.), *Encyclopedia of caves and karst science* (pp. 325-330). London: Taylor & Francis.
- Grund, A. (1903). Die Karsthydrographie. *Pencks geographische Abhandlung*, 7(3), 103-200.
- Hanwell, J., Price, D., & Witcombe, R. (2010). *Wookey Hole - 75 Years of Cave Diving & Exploration*. Wells, Somerset, UK: Cave Diving Group.
- Hauselmann, F. (2002). *Cave genesis and its relationship to surface processes: Investigations in the Siebenhengste region (BE, Switzerland)*. (Tese de Doutoramento), Universität Freiburg, Fribourg. (1383)

-
- Heller, M., & Neumann, A. (2001). *Inner-mountain cartography - from surveying towards information systems*. Paper presented at the 20th ICA Conference, Beijing, China.
- Jeannin, P., Groves, C., & Hauselmann, P. (2007). Speleological investigations. In N. Goldscheider & D. Drew (Eds.), *Methods in karst hydrogeology* (pp. 25-44). London: Taylor & Francis/Balkema.
- Katzer, E. (1909). *Karst und Karsthydrographie*. (Vol. 8). Sarajevo: Zur Kunde der Balkan Halbinsel.
- Machado, A. B., & Machado, B. B. (1948). Inventário das Cavernas Calcárias de Portugal I Congr. Nac. C. Nat (Vol. 36, pp. 444-473). Porto: Publ.Inst. Zool. Dr. Aug. Nobre
- Martel, E. A. (1921). *Nouveau traite des eaux souterraines*. Paris: Editions Doin.
- Mendes de Sousa, V. (1964). Casos de aplicação da espeleologia ao estudo de águas subterrâneas e a problemas de engenharia. *Publicação Especial n.º 3 - Sociedade Portuguesa de Espeleologia*, 8.
- Milanovic, P. (2004). *Water Resources Engineering in Karst*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Monteiro, J. P. (2001). *Characterisation of a carbonate aquifer for the application of a regional discrete continuum flow model* (Tese de Doutoramento), Université de Neuchâtel, Neuchâtel.
- NECA. (2005). *Sistema Cársico do Frade - O fantástico mundo oculto dos minerais*. Sesimbra: Norprint.
- Palmer, A. (1991). Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 1-25.
- Paradela, P. (1971). *Ligação de uma galeria em fundo de poço ao algar de Olho de Água, localizado por geofísica, em Mira de Aire*. Paper presented at the I Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica, Lisboa.
- Paradela, P., & Zbyszewski, G. (1971). *Hidrogeologia geral do centro e sul de Portugal*. Paper presented at the I Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica, Lisboa.
- Peixinho de Cristo, F. (1988). *Análise dos sistemas de abastecimento público de águas nos distritos de Aveiro, Coimbra e Leiria*. Lisboa: Min. Plan. Admin. Territ. (Dir. Geral Rec. Naturais / Dir. Serv. Hidrologia / Div. Geohidrologia).
- Ravbar, N. (2003). The earliest chinese karstologist Xu Xiake. *Acta carsologica*, 17(32/1), 243-254.
- Rhoades, R., & Sinacori, M. N. (1941). The pattern of ground-water flow and solution. *Journal of Geology*, 49, 785-794.
- Rodrigues, M. L. (1998). *Evolução geomorfológica quaternária e dinâmica actual. Aplicações ao ordenamento do território. Exemplos no Maciço Calcário Estremenho*. (Tese de Doutoramento), Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Rodrigues, P. (2011). Speleogenesis of Alecrineiros Shaft. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers* (10), 22-24.
- Roncat, A., Dublyansky, Y., Spotl, C., & Dorninger, P. (2011). *Full-3D Surveying of Caves: A Case Study of Märchenhöhle (Austria)* Paper presented at the Mathematical Geosciences at the crossroads of theory and practice, Salzburg.
- Silvestre, I., Rodrigues, J., Figueiredo, M., & Veiga-Pires, C. (2015). High-resolution digital 3D models of Algar do Penico Chamber: limitations, challenges, and potential. *International Journal of Speleology*, 44(1), 25-35.
- Silvestre, I., Rodrigues, J. I., Figueiredo, M., & Veiga-Pires, C. (2012). *Modelação 3D de grutas*. Paper presented at the 6th International Conference on Digital Arts - ARTECH 2012, Faro (Portugal).
- Soares, A. F., & Conde, L. N. (1956). Contribuição para o estudo das grutas da província da Beira Litoral. *Mem. e Notícias, Publ. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra*
-

- Soares, A. F., Tavares, A. F., & Conde, L. N. (1957). Algumas grutas da província da Beira Litoral. *Mem. e Notícias, Publ. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra.* .
- Sweeting, M. (1995). *Karst in China: Its Geomorphology and Environment* (S. S. B. Media Ed.). Berlin: Springer-Verlag.
- Swinerton, A. C. (1932). Origin of limestones caverns. *Geological Society of America Bulletin*, 43, 662-693.
- Veiga-Pires, C., Moura, D., & Luis, J. (2011). *Detection of speleothem growth bands with an open source geophysical software*. Paper presented at the Climate Change – The Karst Record (KR6), Birmingham (England).
- White, W. (2007). Cave sediments and paleoclimate. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69(1), 76-93.
- Worthington, S. (1991). *Karst Hydrogeology of the canadian Rocky Mountains*. (Doctor of Philosophy), McMaster University, Hamilton, Ontario.
- .

Capítulo 4. Métodos Geofísicos

A aplicação dos métodos geofísicos no reconhecimento das regiões calcárias pode fornecer informações bastante úteis, como a posição do nível freático ou a localização de cavidades. Assim, pretende-se descrever os princípios básicos, vantagens e desvantagens dos métodos elétricos e eletromagnéticos aplicados nas regiões cársicas portuguesas e referenciar alguns dos trabalhos desenvolvidos, quer no âmbito nacional quer internacional.

4.1. Considerações gerais

Os métodos geofísicos são considerados métodos não destrutivos por permitirem caracterizar o subsolo a partir de dados recolhidos à superfície. Estes métodos possibilitam avaliar as condições geológicas através da identificação de contrastes nas propriedades físicas dos materiais (condutividade/resistividade elétrica) resultantes de diferenças litológicas ou outras heterogeneidades naturais (variações no teor em água ou presença de cavidades) ou artificiais (estruturas enterradas). Uma das principais vantagens da aplicação destes métodos é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente reduzido. Algumas metodologias, nomeadamente o radar de penetração no solo ou a resistividade elétrica, permitem adquirir informação ao longo de perfis contínuos, possibilitando a identificação de variações laterais com maior precisão. Contudo, é sempre necessário confrontar os modelos geofísicos com informação geológica de modo a validar os resultados obtidos.

Vários métodos geofísicos foram aplicados nas regiões calcárias revelando informações muito úteis, nomeadamente os sísmicos (p. e. reflexão e refração), elétricos (p. e. resistividade), eletromagnéticos (p. e. RF-EM ou RMT-R) ou mesmo os gravíticos (p. e. gravimetria). Alguns trabalhos (Hoover, 2003; Chalikakis et al., 2011) dão indicações de qual a metodologia mais apropriada de acordo com o objetivo pretendido.

Nas regiões calcárias portuguesas têm sido aplicados os métodos geofísicos elétricos e eletromagnéticos com algum sucesso: a Resistividade Elétrica (RE), o Radar Penetração no Solo (GPR) ou geo-radar, os de transmissão remota (método eletromagnético de muito baixa frequência (VLF-EM), o radiofrequência-eletromagnética (RF-EM) e o radiomagnetotelúrica-resistividade (RMT-R)) e o Eletromagnético Transiente (TEM). Aqui pretende-se expor os fundamentos teóricos e princípios básicos de cada um desses métodos geofísicos, amplamente descritos na bibliografia de especialidade: Beck & Wilson, (1988), Reynolds (1997), Milsom (2003), Burger et al., (2006), Christiansen et al., (2009), Ernstson & Kirsch, (2009) para os métodos da Resistividade Elétrica, geo-radar e TEM e Müller (1983), Stiefelhaven (1998), Thierrin & Müller (1988) e Turberg (1993) para os métodos de transmissão remota.

4.1.1. Resistividade Elétrica (RE)

O método da **Resistividade Elétrica (RE)** consiste na injeção de uma corrente elétrica no terreno através de um par de elétrodo (A e B – elétrodo de corrente) e posterior medição da consequente diferença de potencial com outro par de elétrodo (M e N – elétrodo de potencial). Através da corrente injetada e da diferença de potencial medida à superfície é possível determinar a resistividade aparente do terreno. A resistividade aparente encontra-se dependente das características das várias unidades geológicas (tipo de material e geometria), bem como da posição dos elétrodo relativamente às mesmas (Ernstson & Kirsch, 2009). Após a aquisição, os dados são processados e interpretados a fim de se obter a resistividade “real” das camadas e a respetiva espessura. A resistividade dos materiais geológicos varia entre $1,6 \times 10^{-8} \Omega m$ (prata nativa) e $10^6 \Omega m$ (enxofre puro). Entre as várias tipologias de rochas, as ígneas são as que apresentam valores de resistividade mais altos e as sedimentares os valores mais elevados de condutividade (baixa resistividade) pelo facto de serem mais porosas e, por consequência, maior teor em fluidos (Reynolds, 1997).

Tabela 4.1 - Quadro comparativo entre as quatro principais geometrias de elétrodo (adaptado de Reynolds, 1997).

Propriedades	Schlumberger	Wenner	Dipolo-Dipolo	Polo-Dipolo
Resolução vertical	Boa	Boa	Reduzida	Reduzida
Profundidade de penetração	Moderada	Reduzida	Boa	Boa
Sensibilidade a variações laterais	Moderada ou má	Moderada ou má	Boa	Boa

A resistividade aparente depende da geometria dos elétrodo (ou configuração) utilizada, sendo as configurações mais utilizadas a Schlumberger, Wenner, Dipolo-Dipolo e Polo-Dipolo. Estas

configurações possuem diferentes vantagens, desvantagens e sensibilidades (Tabela 4.1). No caso específico dos maciços cársicos, impõe-se que sejam utilizadas configurações que privilegiem as descontinuidades laterais da resistividade como a dipolo-dipolo e polo-dipolo (Figura 4.1).

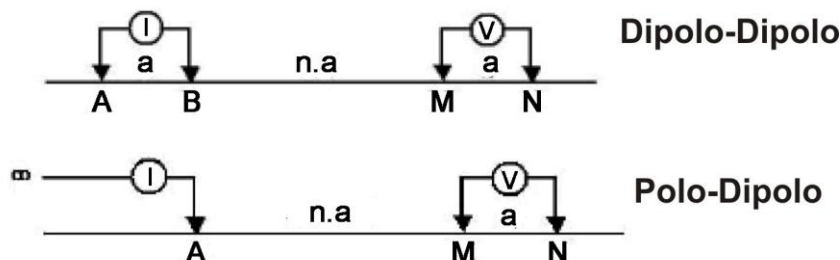


Figura 4.1 - Configurações de elétrodos: Dipolo-Dipolo e Polo-Dipolo (adaptação de Morrison & Gasperikova, 2015), em que n.a=separação de dipolos, a=comprimento do dipolo.

A aquisição de dados de campo pode ser efetuada através de duas técnicas: sondagem elétrica vertical (SEV) e perfil de resistividade elétrica (Tomografia), sendo esta última a mais vantajosa para utilização em meios cársicos, pois permite investigar estruturas geológicas complexas apresentando variações laterais de resistividade (Ernstson & Kirsch, 2009).

No Algar das Corujas (denominado gruta do Zé de Braga em Afonso & Santos, 1988 e Santos & Afonso, 2005) no Maciço Calcário Estremenho (Figura 4.2) foi implementado um perfil de resistividade elétrica, obtendo-se a respetiva inversão a 2D visível na Figura 4.3.

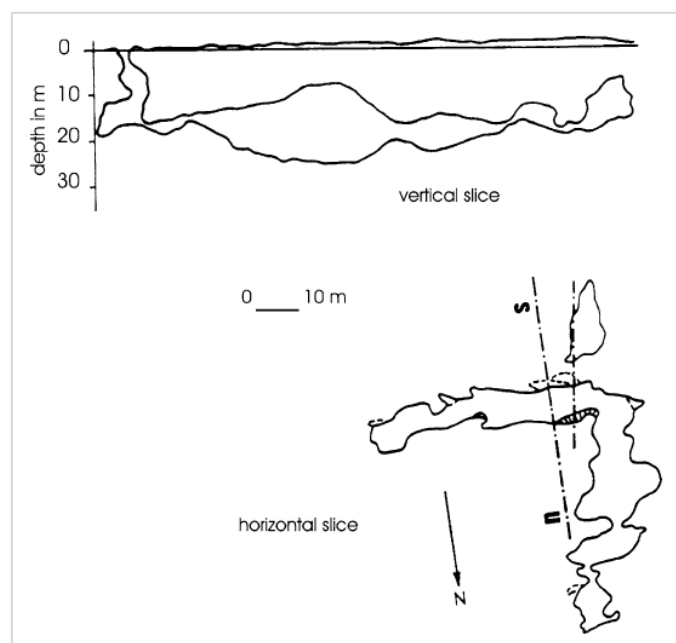


Figura 4.2 - Em cima o corte e em baixo a planta com a localização do perfil n-s na planta do Algar das Corujas, no Maciço Calcário Estremenho. (in: Afonso & Santos, 1988).

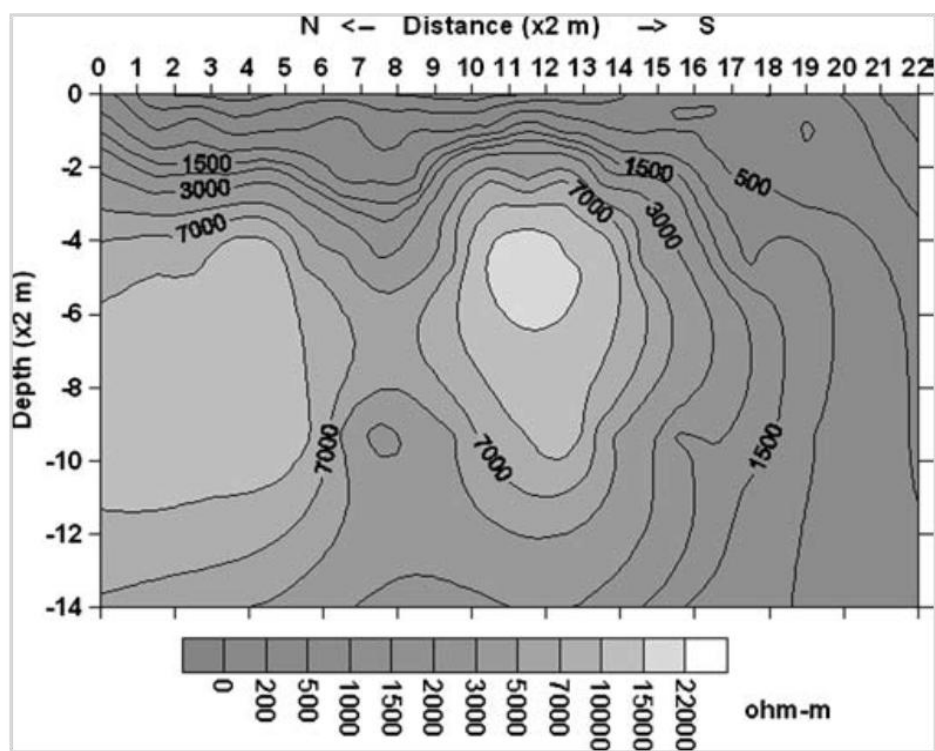


Figura 4.3 - Perfil de resistividade elétrica no Algar das Corujas (Maciço Calcário Estremenho), aplicando a configuração de elétrodos polo-dipolo. Entre os pontos 10 e 13 e à profundidade de 3,5 e 7 metros observa-se a sala conhecida da gruta que o perfil interseita. (in: Santos & Afonso, 2005).

A Resistividade Elétrica tem sido aplicada em diferentes situações, nomeadamente, na definição da profundidade da carsificação no vale Trebišnjica (Bósnia-Herzegovina) por Arandjelović (1966), na deteção de dolinas e cavidades (van Schoor (2002), Zhou et al., (2002) e Ezersky (2008)) ou mesmo no estudo da cunha salina em aquíferos cársicos (Terzić et al., (2007)). Em Portugal, esta metodologia foi aplicada na deteção de cavidades no Algarve, no Maciço Calcário Estremenho e na região de Ansião (Afonso, 1987a, 1987b, 1991; Afonso & Santos, 1988, 1989, 1990; Santos & Afonso, 2005).

O uso da resistividade elétrica em conjunto com outras técnicas geofísicas é comum, nomeadamente com a gravimetria (McGrath et al., 2002) e com o geo-radar (Kruse et al., 2006; El-Qady et al., 2005).

4.1.2. Radar Penetração no Solo (Ground Penetrating Radar - GPR) ou geo-radar

O pressuposto básico do **Radar Penetração no Solo (Ground Penetrating Radar – GPR)**, também conhecido apenas por **geo-radar**, consiste na transmissão de uma onda eletromagnética no terreno e a aquisição das ondas refletidas, provocadas pelas diferentes propriedades dielétricas dos materiais (Olhoeft, 2000; Van Overmeeren, 1994). O equipamento de geo-radar é composto por um gerador de sinal, uma antena transmissora (Tx) e outra recetora (Rx) e por um sistema de aquisição e gravação de dados (Figura 4.4). As antenas podem ser monoestáticas, quando a mesma antena é

utilizada como emissora (Tx) e recetora (Rx), e biestática, quando são utilizadas duas antenas: uma emissora (Tx) e outra recetora (Rx), permitindo medições de grande ângulo (Reynolds, 1997).

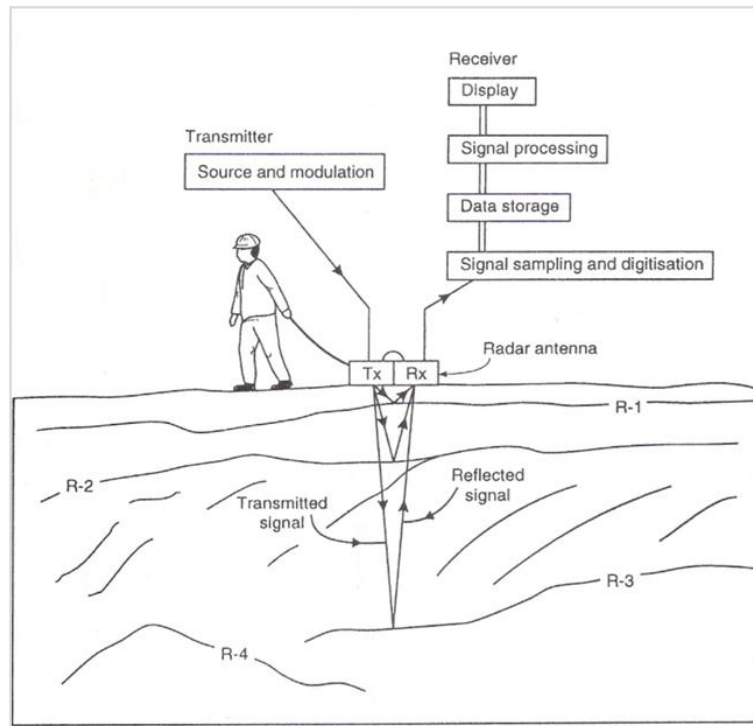


Figura 4.4 - Princípio do Radar de Penetração no Solo (GPR). (in: Reynolds, 1997)

Devido aos sinais de alta frequência (até 500 MHz para a maioria das aplicações nos terrenos calcários) o geo-radar apresenta uma maior resolução, comparativamente ao método da reflexão sísmica, embora alcance menores profundidades de investigação (dezenas de metros para o geo-radar e centenas a milhares de metros para a reflexão sísmica). A propagação das ondas eletromagnéticas depende da constante dielétrica (permissividade) e da condutividade elétrica do meio a atravessar (Betchel et al., 2007).

O sinal do geo-radar é bastante atenuado e consequentemente a profundidade de penetração bastante limitada quando o meio condutor é coberto por um solo rico em argila húmida (p. e. terra rossa) muito frequente nos carcos localizados em climas temperados (Bechtel et al., 2007). Contudo, as rochas calcárias são das mais favoráveis à penetração pelas ondas eletromagnéticas e as diferenças de permissividade entre os calcários, os preenchimentos e os vazios da rocha são suficientemente grandes para originarem anomalias facilmente identificáveis. Deste modo, cavidades, bolsadas de materiais detríticos, depósitos em superfície de falha e níveis piezométricos pouco profundos são habitualmente detetáveis em regiões cársicas com a técnica de Radar de Penetração no Solo (Lopes et al., 2007). Na Figura 4.5 observa-se um radargrama e a sua possível interpretação (Al-fares et al., 2002).

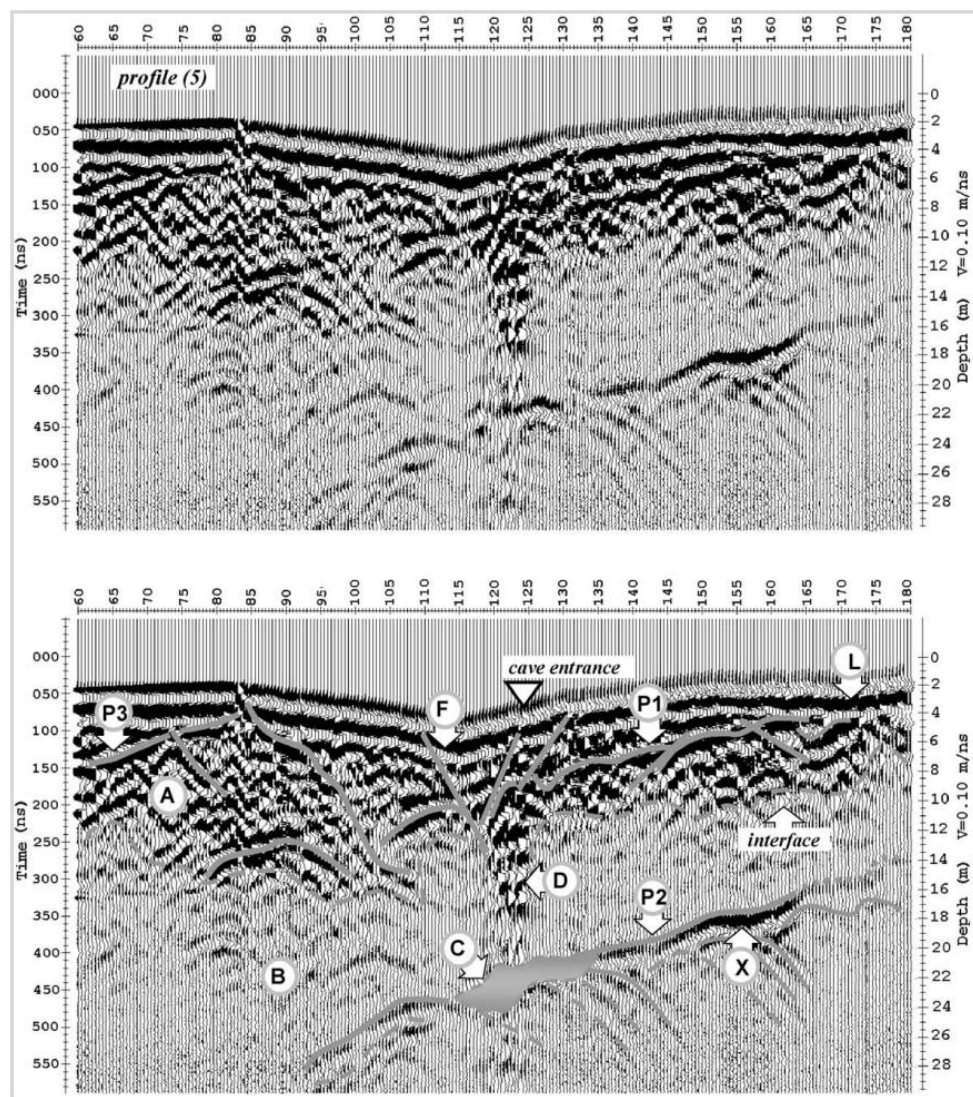


Figura 4.5 - Interpretação do radargrama: A – calcário fraturado do epicarso; B – calcário compacto; C – Gruta de Lamalou; D – poço no interior da gruta; F – Falha; L – Lapiás; P1, P2, P3 – planos de estratificação; X – gruta desconhecida. (in: Al-fares et al., 2002).

Esta metodologia tem sido amplamente utilizada nos terrenos calcários carsificados nomeadamente na deteção e colapso de cavidades e outras formas cársicas (McMechan et al., 1998; Chamberlain et al., 2000; Al-fares *et al.*, 2002; Anchuela et al., 2009; Batayneh et al., 2002; Martinez-Moreno et al., 2014). Mais recentemente tem sido utilizada na identificação de grutas em gelo (Hausmann & Behm, 2011; Colucci et al., 2014). Em Portugal, de entre os estudos de geo-radar em região cársica, salientam-se os realizados para instalação de parques eólicos, onde estava em causa, simultaneamente, a proteção de grutas eventualmente existentes e a garantia de condições geotécnicas adequadas à instalação dos aerogeradores. Outros trabalhos foram publicados utilizando esta técnica nomeadamente no estudo da fracturação no anticlinal de Estremoz (Moura e Senos Matias, 1999) e na deteção de cavidades na serra da Arrábida e no Maciço Calcário Estremenho (Teixeira et al., 2004; Lopes et al., 2007).

4.1.3. Sistemas de transmissão remota

Fazem parte dos sistemas de transmissão remota o método eletromagnético de muito baixa frequência (*Very Low Frequency - Electromagnetics* (VLF-EM)), o método de radiofrequência-eletromagnética (*Radiofrequency-Electromagnetic* (RF-EM)) e o método de radiomagnetotelúrica - resistividade (*Radio MagnetoTeluric Resistivity* (RMT-R)). Todos eles têm em comum a utilização de ondas rádio emitidas por antenas emissoras espalhadas pelo globo terrestre.

Método Eletromagnético de muito baixa frequência (Very Low Frequency - Electromagnetics (VLF-EM))

O método eletromagnético de muito baixa frequência (*Very Low Frequency - Electromagnetics* (VLF-EM)) utiliza sinais de rádio na gama de frequências 3-30 kHz, usadas em comunicações de grandes distâncias nos sistemas de navegação. Em pontos distantes da fonte a onda pode ser considerada plana com o campo magnético horizontal (H_p) e o campo elétrico quase vertical (H_s) (Santos, 2006). Os resultados exprimem-se sob a forma de relação entre as intensidades de ambos os campos e em percentagem ($H_s/H_p\%$) como se exemplifica na Figura 4.6.

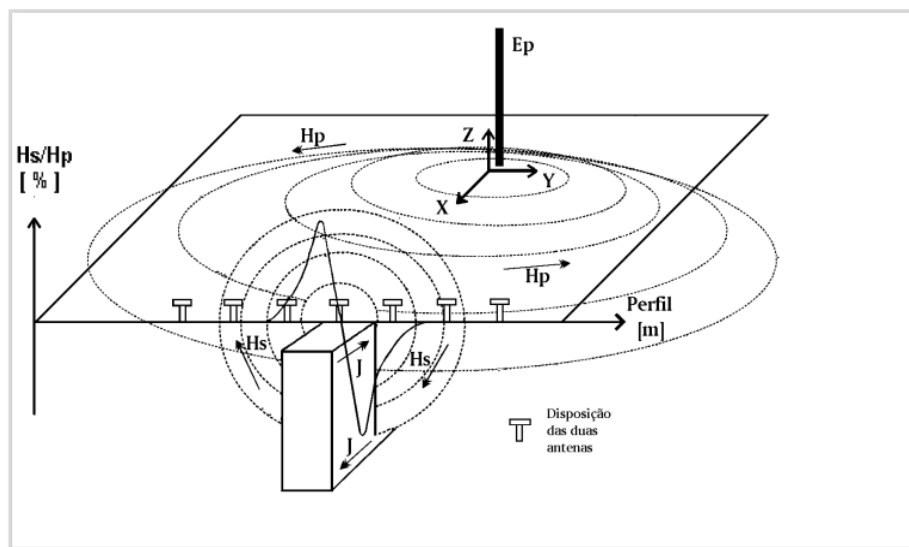


Figura 4.6 - Princípio do método VLF-EM segundo Turberg & Müller (1992). (in: Carvalho Dill et al., 1998)

Método de radiofrequência-eletromagnética (Radiofrequency-Electromagnetic (RF-EM))

O método de Radiofrequência – Eletromagnética (*Radiofrequency-Electromagnetic* (RF-EM)) é um aperfeiçoamento do tradicional método eletromagnético de muito baixa frequência, desenvolvido pela equipa da Universidade de Neuchâtel, conferindo-lhe maior sensibilidade e precisão para aplicação em meios cársicos. O aperfeiçoamento do aparelho de aquisição das ondas rádio veio permitir operar num maior leque de frequências (12 a 240 kHz), registar em contínuo a variação do sinal, e utilizar em simultâneo um registor e gravador dos dados e GPS diferencial permitindo

localizar com exatidão as anomalias encontradas. Apresenta como vantagem o não necessitar de contacto com o solo, podendo ser aplicado manualmente ou ser instalado em veículos automóveis, tal como se pode observar na Figura 4.7 (Carvalho Dill et al., 1998).

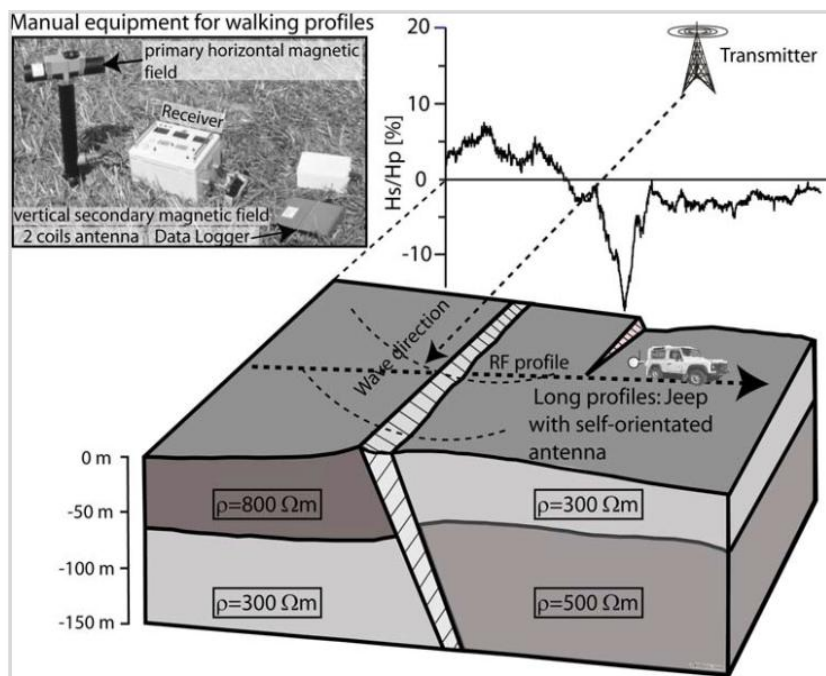


Figura 4.7 - Método Radiofrequency-Electromagnetic (RF-EM): equipamento manual e jipe com antena incorporada. O gráfico representa o sinal obtido de uma falha geológica. (in: Carvalho Dill et al, 2009).

Método de radiomagnetotelúrica-resistividade (*Radio MagnetoTeluric Resistivity (RMT-R)*)

O método de radiomagnetotelúrica-resistividade (*Radio MagnetoTeluric Resistivity (RMT-R)*) utiliza ondas rádio nas frequências entre 12 a 300 kHz, emitidas por antenas espalhadas pelo globo terrestre e na Figura 4.8 observam-se as localizadas na Europa.

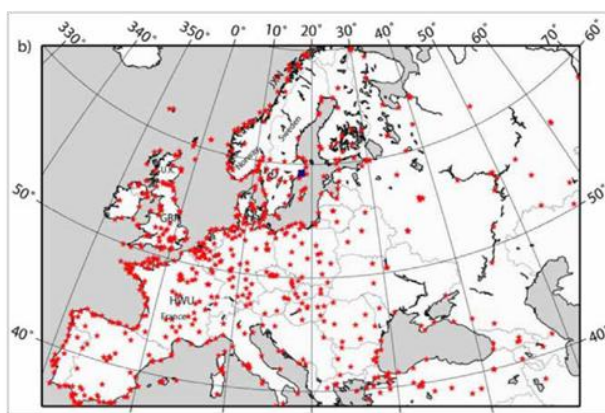


Figura 4.8 - Localização de estações emissoras da frequência 30-300 kHz, na Europa. (in: Oskooi, 2004).

O campo eletromagnético apresenta duas componentes a obter: a componente magnética e a componente elétrica. A medição da componente elétrica é feita através de dois eletrodos enterrados no solo distanciados 5 metros entre si e orientados em direção ao emissor. A intensidade do campo magnético primário é medida através de uma bobine, colocada de modo a que o seu eixo horizontal se encontre perpendicular ao emissor. Obtêm-se assim valores de resistividade aparente (ρ_a) e de desfasagem entre a componente magnética e elétrica.

O dispositivo desenvolvido por Müller (Universidade de Neuchâtel) tem a vantagem de permitir a medição simultânea em 4 frequências, fornecendo informações de 4 profundidades (Figura 4.9), após aplicação de um modelo de inversão, é possível calcular as espessuras e resistividades reais das camadas (Carvalho Dill et al, 1998).

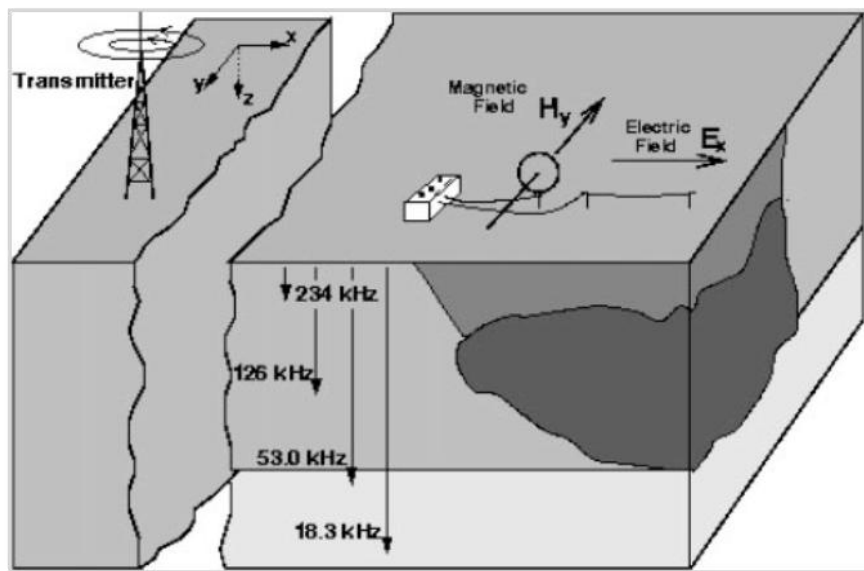


Figura 4.9 - Configuração da metodologia RMT-R. As frequências mais baixas encontram-se associadas a maiores profundidades de penetração. (in: Newman et al., 2003).

Na Figura 4.10 pode-se observar duas secções de resistividade obtidas através do método de radiomagnetotelúrica-resistividade, representando a secção 1 um depósito de moreias e a secção 2 um caos de blocos (Tullen et al., 2006).

Os sistemas de transmissão remota têm sido aplicados nas regiões calcárias tanto para caracterizar a heterogeneidade do meio (Christe et al., 1999; Coppo et al., 2006; Pilli et al., 2012) e na comparação com outros métodos (Bosch & Müller, 2001; 2005). Em Portugal, estas metodologias foram aplicadas na região do Alentejo (Moura-Ficalho e Castelo de Vide) e Algarve (Querença-Silves, Malhão e Escarpão) por Carvalho Dill et al., (1998, 1999), Costa et al., (1998), Nunes et al., (1997) e Nunes (1998).

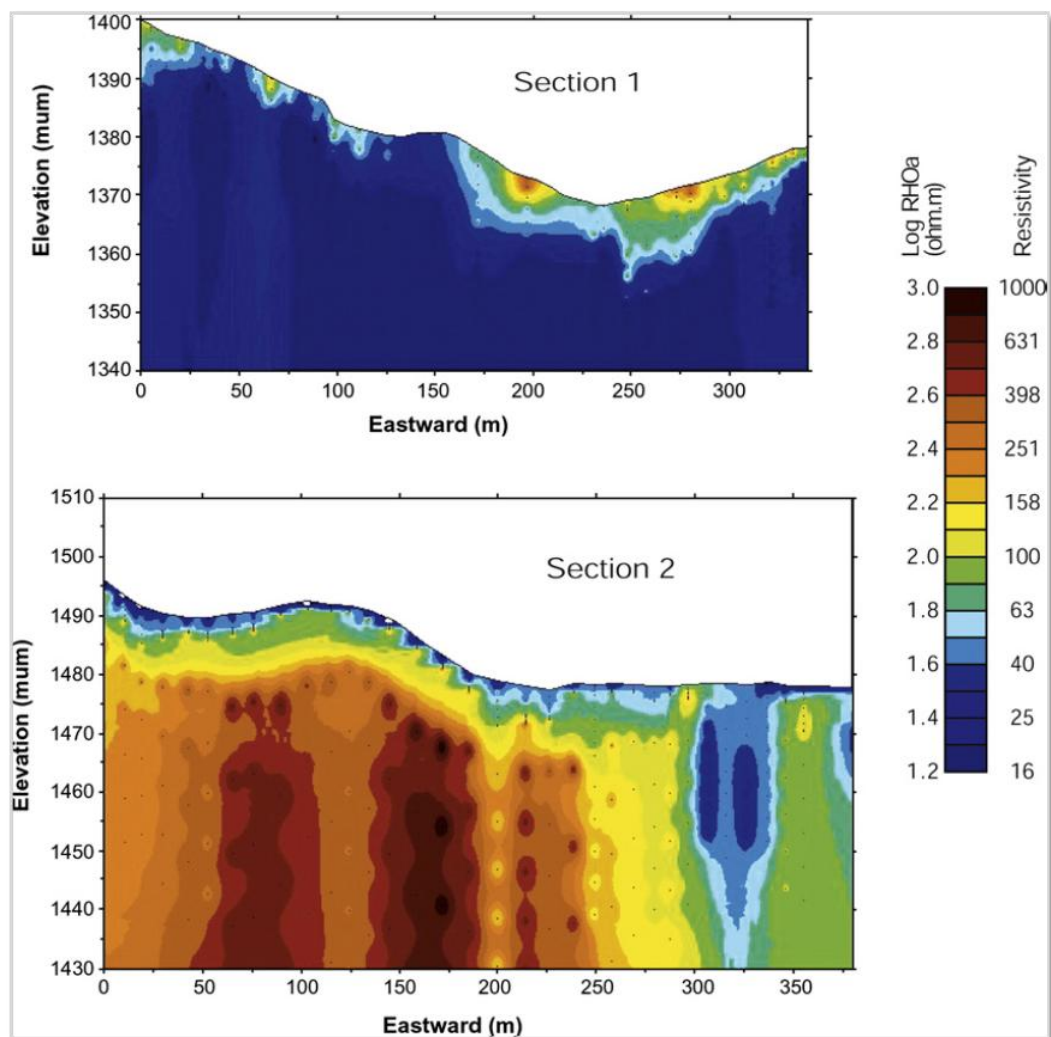


Figura 4.10 - Duas secções de resistividade efetuadas num depósito: secção 1 representa uma moreia e a secção 2 representa um caos de blocos. (in: Tullen et al., 2006).

4.1.4. Método Eletromagnético Transiente – TEM

O método eletromagnético transiente (*Transient Electromagnetic - TEM*), também conhecido como método eletromagnético no domínio do tempo, é um método indutivo de fonte controlada. Os métodos eletromagnéticos no domínio do tempo utilizam uma fonte de sinais transientes (entre 1000 e 10000 pulsos) em vez de ondas contínuas, possibilitando a medição do campo eletromagnético secundário após o campo primário ser desligado. Na presença de bons condutores, as correntes induzidas decaem mais lentamente do que na presença de fracos condutores. A medição da taxa de decaimento da corrente induzida permite, assim, localizar os condutores e determinar a sua condutividade (Burger et al., 2006).

Neste método o campo primário é gerado por pulsos da ordem dos milissegundos e posteriormente desligado. O campo secundário induzido no subsolo é então medido (Figura 4.11). Os dados

recolhidos logo após corte de corrente (*early times*) corresponde ao material geológico mais superficial e os dados recolhidos mais tarde (*late times*) corresponde ao material mais profundo (Christiansen et al, 2009).

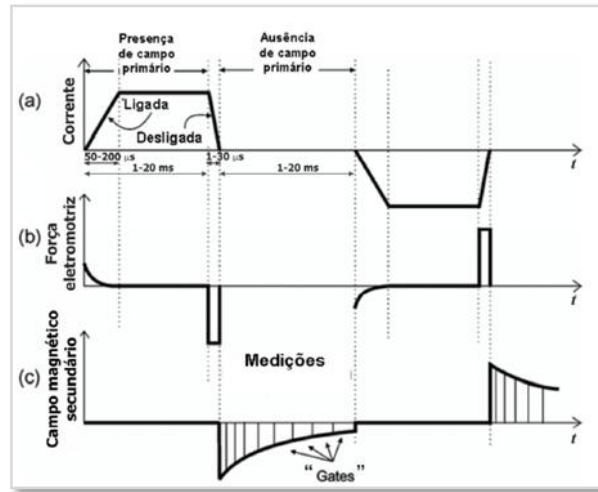


Figura 4.11 - Comportamento dos vários elementos do processo transiente. (a) Variação da corrente no transmissor ao longo do tempo; (b) Variação da corrente induzida no terreno; (c) Variação do campo magnético secundário medido no recetor (adaptado de Christiansen et al. 2009).

Uma sondagem TDEM é realizada através da colocação de espiras (*loops* - circuito fechado quadrado ou redondo efetuado por meio de cabo elétrico) sobre a superfície do terreno a investigar, as quais vão funcionar como transmissor e recetor de sinal. As espiras possuem geralmente uma forma quadrada, com dimensões que podem variar entre 1x1 m e 2000x2000 m, utilizando-se as maiores dimensões para investigação a grande profundidade (Christiansen et al, 2009). Após a aquisição dos dados de campo, efetua-se a sua inversão a fim de se obter a resistividade “real” e a espessura das camadas geoeletricas. A possibilidade de utilizar apenas um *loop*, quer para a indução quer para a deteção do campo induzido, torna os trabalhos de campo relativamente expeditos (Correia et al., 2010). As características do ambiente envolvente à secção em estudo, o tamanho do *loop*, a intensidade de corrente injetada no solo ou a presença de estruturas elétricas e metálicas, são os fatores que mais influenciam a qualidade dos dados (Gonçalves, 2012).

O método transiente foi inicialmente desenvolvido para a prospeção mineral sendo posteriormente aplicado a estudos de hidrogeologia e delimitação de plumas de contaminação (Ramos, 2013). Nas regiões calcárias há alguns trabalhos aplicando este método nomeadamente na prospeção de água doce no meio insular (Richards et al., 1998) e definição da morfologia cársica (Frumkin et al., 2011). Em Portugal esta metodologia foi aplicada na ressurgência Olhos de Fervença, Cantanhede (Correia et al., 2010) e na Serra da Boa Viagem, na investigação da falha de Quiaios (Machadinho et al., 2010), como se pode observar na Figura 4.12.

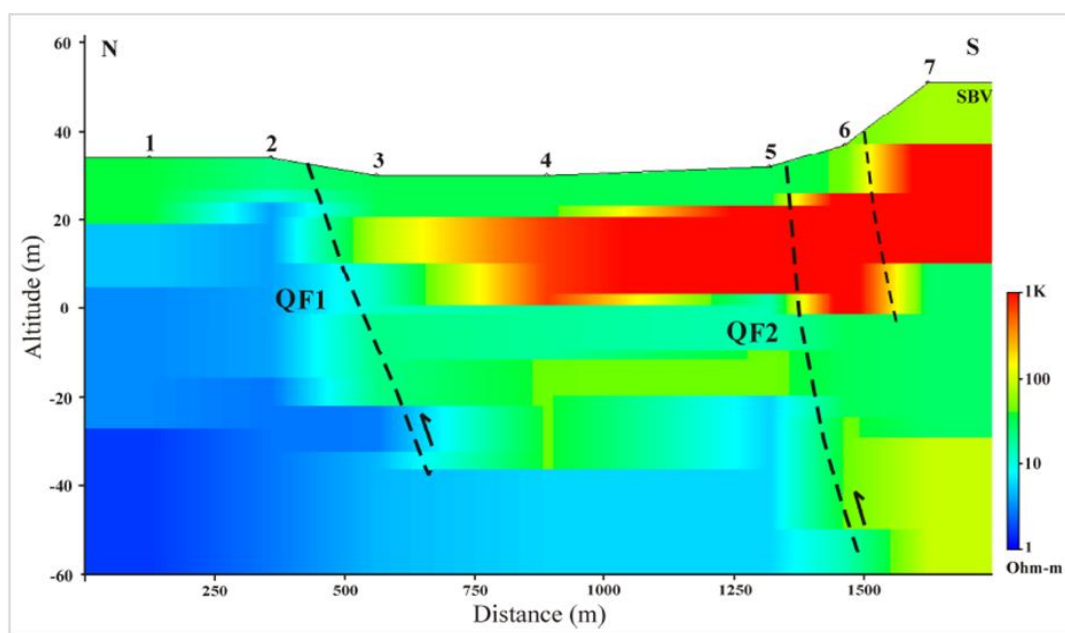


Figura 4.12 - Secção geoelectrica, utilizando o sistema TEM-FAST 48, inferindo os planos da falha de Quialhos (Serra da Boa Viagem). (in: Machadinho et al., 2010).

4.2. Referências bibliográficas

- Al-fares, W., Bakalowicz, M., Guérin, R., & Dukhan, M. (2002). Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Hérault, France) with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 51(2-4), 97-106. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00215-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00215-X)
- Afonso, A. R. (1987a). Prospeção Geoelectrica em Meios Cársticos. *Geolis*, 1, 124-133.
- Afonso, A. R. (1987b). Prospeção Geoelectrica em Meios Cársticos na Região de Ansião (resultados preliminares). *ALGAR - Boletim da Sociedade Portuguesa de Espeleologia*, 1, 17-22.
- Afonso, A. R. (1991). Prospeção Geoelectrica em Zonas Costeiras. *Revista Brasileira de Geofísica* 9(2), 177-185.
- Afonso, A. R., & Santos, F. A. M. (1988). Aplicação da Prospeção Geofísica ao Estudo do Bordo Sul do Maciço Calcário Estremenho. *ALGAR - Boletim da Sociedade Portuguesa de Espeleologia*, 2, 7-16.
- Afonso, A. R., & Santos, F. A. M. (1989). A Prospeção Geoelectrica na Detecção da Circulação de Águas Subterrâneas em Meios Cársticos. Paper presented at the IV Simp. Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos.
- Afonso, A. R., & Santos, F. A. M. (1990). O método da resistividade na detecção de cavidades. *Livro de Homenagem a Carlos Romariz*, 65-79.
- Anchuela, O. P., Casas-Sainz, A. M., Soriano, M. A., & Pocoví-Juan, A. (2009). Mapping subsurface karst features with GPR: results and limitations *Environ Geol*, 58, 391-399. doi:10.1007/s00254-008-1603-7
- Arandjelović, D. (1966). Geophysical methods used in solving some geological problems encountered in the construction of the Trebišnjica water power plant (in Yugoslavia). *Geophysical Prospecting*, 14(1), 80-97.

-
- Batayneh, A. T., Abueladas, A. A., & Moumani, K. A. (2002). Use of ground-penetrating radar for assessment of potential sinkhole conditions: an example from Ghor al Haditha area, Jordan. *Environmental Geology*, 41, 977-983.
- Bechtel, T., Bosch, F., & Gurk, M. (2007). Geophysical methods. In N. Goldscheider & D. Drew (Eds.), *Methods in Karst Hydrogeology* (pp. 171-199). Londres: Taylor & Francis/Balkema.
- Beck, B., & Wilson, W. (1988). *Interpretation of Ground Penetrating Radar* Paper presented at the Second Conference on Environmental Problem in Karst Terranes and their solutions Conference "Profiles in Karst Terranes", Nashville, Tennessee.
- Bosch, F., & Müller, I. (2001). Continuous gradient VLF measurements: A new possibility for high resolution mapping of karst structures *First Break*, 19, 343-350.
- Bosch, F. P., & Müller, I. (2005). Improved karst exploration by VLF-EM-gradient survey: comparison with other geophysical methods *Near Surface Geophysics*, 299-310.
- Burger, H. R., Sheehan, A. F., & Jones, C. H. (2006). *Introduction to Applied Geophysics. Exploring the shallow subsurface* W. W. Norton & Company, Inc.
- Carvalho Dill, A., Müller, I., Costa, A. M., & Monteiro, J. P. (1998). *Importância do uso de métodos geofísicos electromagnéticos Very Low Frequency Electromagnetics (VLF-EM) e Radio Magnetotelluric - Resistivity (RMT-R) no estudo de aquíferos cársicos do Alentejo e do Algarve* Paper presented at the 4º Congresso da Água, Lisboa.
- Carvalho Dill, A., Dussel, M., Reis, E., Baptista, R., Coimbra, R., & Reis, M. (1999). The combined use of electromagnetic methods and tracers to detect preferential groundwater pathways. In M. O. Alarcón & J. A. López Geta (Eds.), *Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología* (pp. 217-220): Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- Carvalho Dill, A., Turberg, P., Müller, I., & Parriaux, A. (2009). The combined use of radio-frequency electromagnetics and radiomagnetotellurics methods in non-ideal field conditions for delineating hydrogeological boundaries and for environmental problems *Environmental Geology*, 56, 1071-1091. doi:10.1007/s00254-008-1208-1
- Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R., Valois, R., & Bosch, F. (2011). Contribution of geophysical methods to karst-system exploration:an overview. *Hydrogeology Journal*, 19, 1169-1180. doi:10.1007/s10040-011-0746-x
- Chamberlain, A. T., Sellers, W., Proctor, C., & Coard, R. (2000). Cave Detection in Limestone using Ground Penetrating Radar. *Journal of Archaeological Science*, 27(10), 957-964. doi:http://dx.doi.org/10.1006/jasc.1999.0525
- Christe, R., Meury, P., & Müller, I. (1999). *Fault, karst cavity detection with simultaneous radio magnetotellurics (RMT) and continuously recording very low frequency - electromagnetic (VLF-EM) survey. A case study in the swiss Jura*. Paper presented at the 5th EEGS-ES Meeting
- Christiansen, A., Auken, E., & Sorensen, K. (2009). The transient electromagnetic method. In R. Kirsch (Ed.), *Groundwater Geophysics - A tool for hydrogeology* (pp. 179-225). Berlin Heidelberg New York: Springer.
- Colucci, R., Forte, E., & Fontana, D. (2014). *Characterization of two permanent ice cave deposits in the southeastern Alps (Italy) by means of ground penetrating radar (GPR)*. Paper presented at the 6th International Workshop on Ice Caves, Idaho Falls, Idaho (USA).
- Coppo, N., Schnegg, P. A., Défago, M., & GSCB. (2006). *Mapping a shallow large cave using a high-resolution Very Low Frequency Electromagnetic method*. Paper presented at the 8th conference on limestone hydrogeology, Neuchatel, Switzerland
-

- Correia, C. G., Cruz, R. J. L., Machadinho, A., Figueiredo, F., Marques, S. M., & Senos Matias, M. (2010). Prospecção Electromagnética no Domínio Tempo aplicada a Olhos da Fervença, Cantanhede, Portugal. *Revista Electrónica de Ciências da Terra (e-Terra)*, 14(7), 1-4.
- Costa, A. M., Carvalho Dill, A., Müller, I., & Oliveira, V. (1998). *Monitorização dos Aquíferos da região de Moura-Ficalho*. Paper presented at the 4º Congresso da Água, Lisboa.
- El-Qady, G., Hafez, M., Abdalla, M. A., & Ushijima, K. (2005). Imaging Subsurface cavities using geoelectric tomography and ground-penetrating radar. *Journal of Cave and Karst Studies*, 67(3), 174-181.
- Ernstson, K., & Kirsch, R. (2009). Geoelectrical methods. In R. Kirsch (Ed.), *Groundwater Geophysics - A tool for hydrogeology* (pp. 85-117). Berlin Heidelberg New York: Springer.
- Ezersky, M. (2008). Geoelectric structure of the Ein Gedi sinkhole occurrence site at the Dead Sea shore in Israel. *Journal of Applied Geophysics*, 64(3-4), 56-69. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2007.12.003>
- Frumkin, A., Ezersky, M., Al-Zoubi, A., Akkawi, E., & Abueladas, A. (2011). The Dead Sea sinkhole hazard: Geophysical assessment of salt dissolution and collapse *Geomorphology*, 134, 102-117.
- Gonçalves, S. (2012). *Anisotropia em TDEM: Estudos Sintéticos*. (Tese de Mestrado), Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Hausmann, H., & Behm, M. (2011). Imaging the structure of cave ice by ground-penetrating radar. *The Cryosphere*, 5, 329-340. doi:10.5194/tc-5-329-2011
- Hoover, A. (2003). *Geophysical choices for karst investigations*. Paper presented at the 9th Multidiciplinary Conference on Sinkholes & the Engineering and Environmental Impacts of Karst Huntsville Alabama.
- Kruse, S. E., Grasmueck, M., Weiss, M., & Viggiano, D. (2006). Sinkhole Structure Imaging in Covered Karst Terrain *Geophysical Research Letters*, 33(L16405). doi:10.1029/2006GL026975
- Lopes, L. M., Crispim, J. A., & Teixeira, E. (2007). *Deteção de património cárlico subterrâneo com a técnica de radar de penetração no solo: exemplos de Vila Moreira (Alcanena)* Paper presented at the Simpósio Ibero-Americano sobre Património geológico, arqueológico e mineiro em regiões cárlicas, Batalha.
- Machadinho, A., Cruz, R. J. L., Correia, C. G., Figueiredo, F. P., & Gama Pereira, L. (2010). *Gravimetric and TEM prospection applied to the Quiaios Fault Structure (Serra da Boa Viagem, Central Portugal)* Paper presented at the GeoMod 2010 - Modelling in Geosciences, Lisboa.
- Martínez-Moreno, F. J., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A., Teixido, T., Ruano, P., Peña, J. A., . . . Martín-Rosales, W. (2014). Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 107(0), 149-162. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.021>
- McGrath, R. J., Styles, P., Thomas, E., & Neale, S. (2002). Integrated high-resolution geophysical investigations as potential tools for water resource investigations in karst terrain *Environmental Geology*, 42, 552-557.
- McMechan, G. A., Loucks, R. G., Zeng, X., & Mescher, P. (1998). Ground penetrating radar imaging of a collapsed paleocave system in the Ellenburger dolomite, central Texas. *Journal of Applied Geophysics*, 39(1), 1-10. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851\(98\)00004-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851(98)00004-4)
- Milsom, J. (2003). *Field Geophysics* (3th Edition ed.). West Sussex (England): John Wiley & Sons Ltd.
- Morrison, F., & Gasperikova, E. (2015). The Berkeley Course in Applied Geophysics. (<http://appliedgeophysics.berkeley.edu>)

-
- Moura, R., & Senos Matias, M. (1999). Radar de Penetração (GPR: Ground Penetrating Radar) aplicado ao estudo de fracturação em mármore do anticlinal de Estremoz (Alentejo – Portugal). *Comunicações Instituto Geológico Mineiro*, tomo 86, 289-300.
- Müller, I. (1983). *Anisotropic properties of rocks detected with electro-magnetic VLF (Very Low Frequency)*. Paper presented at the International Symposium on Field measurements in Geomechanics, Zurique, (Suíça).
- Newman, G. A., Recherz, S., Tezkan, B., & Neubauer, M. (2003). 3D inversion of a scalar radio magnetotelluric field data set. *Geophysics*, 68(3), 791-802. doi:10.1190/1.1581032
- Nunes, L. (1998). *Estimativa do campo de permeabilidades potenciais e dos tensores de macrodispersividade em aquíferos heterogêneos a partir de informação geofísica* (Tese de Mestrado), Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Nunes, L., Carvalho Dill, A., & Ribeiro, L. (1997). *Caracterização geoestatística das heterogeneidades do meio aquífero envolvente à lixeira de Escarpão com base em dados geofísicos*. Paper presented at the Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Maputo.
- Olhoeft, G. R. (2000). Maximizing the information return from ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 43(2-4), 175-187. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00057-9
- Oskooi, B. (2004). *A broad view on the interpretation of electromagnetic data (VLF, RMT, MT, CSTMT)*. (Tese Doutorado), Universitatis Upsaliensis, Uppsala.
- Pilli, A., Sapigni, M., & Zuppi, G. M. (2012). Karstic and alluvial aquifers: a conceptual model for the plain – Prealps system (northeastern Italy). *Journal of Hydrology*, 464-465, 94-106. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.049
- Ramos, R. (2013). *Contribuição dos métodos geofísicos para o modelo evolutivo da região de Santo André desde o último máximo glaciário*. (Tese de Doutorado), Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (Wiley Ed.): Wiley.
- Richards, R., Troester, J., & Martínez, M. I. (1998). An Electromagnetic Geophysical Survey of the Freshwater Lens of Isla de Mona, Puerto Rico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 60(2), 115-120.
- Santos, F. (2006) *Prospecção Geofísica I - Técnicas para investigação de estruturas superficiais – Métodos Indutivos* (pp. 1-34).
- Santos, F. A. M., & Afonso, A. R. (2005). Detection and 2d modelling of cavities using pole-dipole array *Environmental Geology*, 48, 108-116. doi:10.1007/s00254-005-1272-8
- Stiefelhagen, W. (1998). *Radio Frequency Electromagnetics (RF-EM): Kontinuierlich messendes Breitband-VLF, erweitert auf hydrogeologische Problemstellungen* (PhD), University of Neuchatel, Neuchatel.
- Teixeira, E., Machado, J., & Crispim, J. A. (2004). *Diferenças entre dois métodos de aquisição de dados na detecção de cavidades cársticas com GPR*. Paper presented at the 1º Simpósio de GPR, Fortaleza, Brasil.
- Terzić, J., Sumanovac, F., & Buljan, R. (2007). An assessment of hydrogeological parameters on the karstic island of Dugi Otok, Croatia *Journal of Hydrology*, 343, 29-42. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.06.008
-

- Thierrin, J., & Müller, I. (1988). *La méthode VLF-Résistivité multifréquence, un exemple d'exploration hydrogéologique dans un synclinal crétacé à la Brévine (Jura neuchâtelois)* Paper presented at the Quatrième Colloque d'Hydrogéologie en pays calcaire Besançon (França).
- Tullen, P., Turberg, P., & Parriaux, A. (2006). Radiomagnetotelluric mapping, groundwater numerical modelling and 18-Oxygen isotopic data as combined tools to determine the hydrogeological system of a landslide prone area. *Engineering Geology*, 87(3-4), 195-204. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.07.004>
- Turberg, P. (1993). *Apport de la cartographie radiomagnetotellurique à l'hydrogéologie des milieux fracturés* (Tese de Doutoramento), Université de Neuchâtel, Neuchâtel.
- Turberg, P., & Müller, I. (1992). La méthode inductive VLF-EM pour la prospection hydrogéologique en continu du milieu fissuré *Annales Scientifiques de l'Université de Besançon, Memoire Hors de Série* (Vol. n.º 11, pp. 207-214). Neuchâtel (Suíça): Cinquième Colloque d'Hydrogéologie en pays calcaire et en milieu fissuré.
- van Overmeeren, R. A. (1994). Georadar for hydrogeology. *First Break*, 12(8), 401-408.
- van Schoor, M. (2002). Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 50(4), 393-399. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00166-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00166-0)
- Zhou, W., Beck, B., & Adams, A. (2002). Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography *Environmental Geology*, 42(9), 922-928. doi:10.1007/s00254-002-0594-z

Capítulo 5. Testes de Traçagens Com Traçadores Artificiais

Os testes de traçagens são das técnicas mais eficazes na investigação das áreas de recarga e direções de escoamento das regiões calcárias (Benischke et al., 2007). Neste capítulo é efetuada uma abordagem aos traçadores artificiais mais empregues na atualidade e a descrição sucinta dos já aplicados em Portugal (traçadores fluorescentes: fluoresceína sódica (uranina), rodaminas, tinopal; traçadores em partículas ou traçadores biológicos: bacteriófagos). Abordam-se as técnicas de injeção e reconhecimento do traçador assim como a avaliação e interpretação dos dados obtidos nos testes de traçagens. É também feita uma resenha da aplicação desta técnica nas regiões cársicas portuguesas e suas conclusões.

5.1. Considerações gerais

Os testes de traçagens com traçadores artificiais consistem na introdução de uma ou mais substâncias de forma deliberada no sistema e posterior reconhecimento no local de amostragem, por exemplo numa nascente, com vista à caracterização do escoamento subterrâneo. A primeira experiência de traçagem de que há registo remonta à década 10 d.C. onde cascas de trigo e serradura foram utilizadas como traçadores (Käss, 1998). Vários séculos depois, em 1871, foi sintetizado o primeiro traçador fluorescente, a fluoresceína sódica ($C_{20}H_{12}O_5$) por Adolf Von Baeyer (Käss, 1998; Benischke et al., 2007; Ford & Williams, 2007). Knop, em Setembro de 1877 (citado por Käss, 1998) levou a cabo o primeiro teste de traçagem com este traçador que viajou uma distância de 12 km em dois dias. Desde então, a fluoresceína sódica tem sido amplamente aplicada, individualmente ou em conjunto com outros traçadores, por forma a identificar e compreender o escoamento nos sistemas cársicos.

Tal como Käss (1998) menciona “não há um traçador ideal”. Dentro das vantagens e limitações de cada traçador, a escolha recai no que melhor se adequa às características do meio a investigar. Os traçadores artificiais podem ser classificados entre traçadores que se dissolvem ou não com a água, sendo os traçadores fluorescentes, sais, aromas e outros químicos exemplos do primeiro caso e as microesferas, esporos coloridos, bactérias e bacteriófagos exemplos do segundo caso (Käss, 1998; Benischke et al., 2007).

Atualmente este tema está amplamente discutidos na bibliografia: Smart et al., 1977; Davis et al., 1980 e 1985; Field et al, 1995; Field, 2002; Käss, 1998; Keswick, 1982; Aley, 2002; Leibundgut et al., 2009.

5.2. Testes de traçagens com traçadores fluorescentes

5.2.1. Traçadores fluorescentes

Várias substâncias orgânicas naturais ou sintéticas contêm um grupo funcional aromático (estrutura em anéis de carbono) que é fluorescente. Absorve a luz num determinado comprimento de onda (absorção, excitação ou extinção) e reemitem a luz num maior comprimento de onda (fluorescência ou emissão). Alguns traçadores fluorescentes são excelentes traçadores das águas subterrâneas por normalmente estarem ausentes no meio ambiente, terem um baixo limite de deteção, bastante solúveis em água, não tóxicos, relativamente económicos e fáceis de manusear. A maioria dos traçadores fluorescentes pode ser detetado instrumentalmente até concentrações 1000 vezes menores do que a visão permite (Meus et al, 1999).

Tabela 5.1 - Propriedades de alguns traçadores fluorescentes. Os limites de deteção representam a ordem de magnitude e são válidas para águas limpas e fluorómetro moderno (Adaptado de Benischke et al., 2007 e Behrens et al., 2001).

Traçadores Artificiais	N.º	Traçador Artificial CAS RN	Limite de Deteção (µg/L)	Fundo natural	Toxicidade	Interfere com	Outros problemas
Traçadores fluorescentes	1	Uranina 518-47-8	10 ⁻³	Ausente	Seguro	2,6	Forte absorção Sensível à luz
	2	Eosina 17372-87-1	10 ⁻²	Ausente	Seguro	1,4	
	3	Sulforrodamina B 3520-42-1	10 ⁻²	Ausente	Perigoso para meio	4,5,6	
	4	Amidorrodamina G 5873-16-5	10 ⁻²	Ausente	Seguro	2,3,5,6	
	5	Rodamina WT 37299-86-8	10 ⁻²	Ausente	Genotóxico	3,4,6	
	6	Rodamina B 81-88-9	10 ⁻²	Ausente	Genotóxico	3,4,5	
	7	Naftionato 130-13-2	10 ⁻¹	Ausente	Seguro	8,COD*	
	8	Tinopal 27344-41-8	10 ⁻¹	Ausente	Seguro	7,COD*	

*COD – Carbono orgânico dissolvido

Na Tabela 5.1 estão compiladas algumas características dos traçadores mais utilizados atualmente. O mesmo traçador fluorescente tem diferentes denominações consoante a companhia que o produz e o país onde é comercializado. Para uniformizar as várias substâncias é atribuído o CAS RN (Chemical Abstracts Services Registry Number).

A **Uranina (fluoresceína sódica)** é um traçador económico, seguro, bastante solúvel (600 g/L a 20°C) e não tóxico. O seu limite de deteção é excecional: aproximadamente 0,005 µg/L ou mesmo 0,001 µg/L em condições muito favoráveis. Apresenta uma coloração verde quando a concentração é superior a 10 µg/L e vermelha quando é superior a 1 g/L. A luz do sol e oxidantes fortes destroem-na pelo que o seu uso em águas de superfície ou em águas cloretadas não é adequado. As amostras de águas devem ser conservadas no frio e no escuro e analisadas o mais breve possível para evitar degradação microbiana (Benischke et al., 2007). As **rodaminas** são um grupo de traçadores fluorescentes vermelhos e apresentam características químicas muito idênticas. A rodamina WT, rodamina B, rodamina 6G e a rodamina 3G devem ser evitadas como traçadores devido à sua toxicidade e/ou às propriedades de forte absorção (Käss, 1998; Behrens et al., 2001). A sulforodamina B e a amidorodamina G são menos propensas à adsorção embora apresentem alguma perigosidade para os sistemas aquáticos (Behrens et al., 2001). As rodaminas absorvem e emitem luz num alto comprimento de onda facilitando a sua separação dos outros traçadores em análise. Em comparação com a uranina são menos sensíveis à luz e ao pH (Benischke et al., 2007). O **Tinopal CBS-X** é frequentemente utilizado como traçador mas é fortemente adsorvido pela argila pelo que a sua recuperação é geralmente baixa e com significativa retardação. O tinopal não é recomendado em águas ácidas embora em sistemas com galerias bem desenvolvidas possa ser usado para longas distâncias (Käss, 1998).

5.2.2. Quantidade a injetar

A problemática da quantidade de traçador a injetar está bastante discutida na bibliografia. Field (2003) compilou 33 equações empíricas desenvolvidas por vários autores durante o século XX para determinar a quantidade de traçador adequado a injetar. Cada equação acaba por refletir a experiência do seu autor assim como as propriedades do meio onde a aplicou. Worthington & Smart (2003) coligiram as características de duas centenas de testes de traçagens com traçadores fluorescentes e sais, incluindo os dados de Crispim (1995), obtendo uma equação que determine a massa a injetar. A metodologia EHTD "*Efficient hydrologic tracer-test design methodology*", desenvolvida por Field (2002) para estimar a quantidade de traçador a injetar assim como a frequência de amostragem, também pode ser aplicada desde que se conheçam alguns parâmetros hidráulicos (p. e. transmissividade) do sistema *a priori*, algo que nem sempre é possível. A simples

aplicação das várias fórmulas nem sempre é suficiente para estimar a quantidade ideal de traçador a injetar pelo que o conhecimento e experiência do investigador na área em estudo são fulcrais.

5.2.3. Injeção e amostragem

A seleção dos pontos de injeção está intimamente relacionada com o objetivo da experiência em causa, nomeadamente a contribuição para o conhecimento da rede de escoamento subterrânea ou estudos mais específicos como, por exemplo, a tentativa de quantificar a biodegradação de contaminantes na zona não saturada dos sistemas cárnicos. Se o objetivo da traçagem é o investigar a rede de galerias subterrâneas inundadas, a injeção será realizada no nível freático ou o mais perto possível. Os furos de captação podem ser excelentes pontos de injeção se interceptarem galerias ativas (Benischke et al., 2007). A **injeção instantânea** consiste na introdução de traçador na água no período de tempo mais curto possível. Com este tipo de injeção pretende-se simular o impacto de contaminantes largados acidentalmente e calcular propriedades hidráulicas do escoamento subterrâneo a partir da curva de restituição do traçador (Benischke et al. 2007). No seu trabalho, Savoy (2008) fez a **injeção em contínuo** (máximo de 14 horas numa das experiências) através de um pulverizador reproduzindo o comportamento de um foco de contaminação persistente.

Nos aquíferos cárnicos, os locais mais favoráveis à colheita de amostras são as nascentes, as grutas com acesso ao nível freático, os furos de captação e os piezómetros. Os locais de amostragem (locais onde o traçador é esperado) e os locais de controlo (locais onde o traçador pode ou não ser observado) são monitorizados antes e durante a experiência de traçagem e controlado o seu fundo (fluorescência natural do sistema). A amostragem pode ser realizada de três formas (Benischke et al., 2007): amostragem integrativa, amostragem momentânea ou instantânea e medição em contínuo. A **amostragem integrativa** refere-se à quantidade de traçador que passa durante um determinado intervalo de tempo. O carvão ativado, lã, algodão ou resinas (Käss, 1998; Close et al., 2002) são algumas das substâncias utilizadas para absorver o traçador. Os fluocaptadores de carvão ativado foram e continuam a ser os mais empregues e são constituídos por alguns grãos de carvão ativado num saco de gaze. As vantagens da sua utilização prendem-se com o facto de serem de fácil colocação, pouco dispendiosos e pouco suscetíveis de vandalismo. A **amostragem momentânea** consiste na colheita de amostras de água manualmente ou com recurso a amostradores automáticos. A resolução deste método de amostragem está dependente da periodicidade da colheita de amostras. Os amostradores automáticos são, geralmente, constituídos por várias garrafas que recolhem uma amostra de água a cada intervalo de tempo estipulado (Benischke et al., 2007). A **medição em contínuo** requer instrumentação para tal. O fluorómetro de campo com registo/gravação de dados é um instrumento que permite a medição em contínuo da concentração

de traçador com uma boa resolução temporal. Este sistema é menos suscetível à contaminação mas tem a desvantagem de não recolher e guardar as amostras.

5.2.4. Análise qualitativa e quantitativa

Devido às suas propriedades óticas, os traçadores fluorescentes são de fácil análise qualitativa. Käss (1998) refere a possibilidade de visualizar a uranina até uma concentração de 5 µg/l, num quarto escuro, quando projetada luz sobre a tina com amostra. Este é o princípio utilizado nos fluoroscópios que foram desenvolvidos até pouco mais dos meados do século XX para investigação da fluorescência natural ou artificial. O último a ser desenvolvido pertence ao Prof. N. Cadez-Novak, apresentado no 1º Simpósio em Graz/Áustria em 1969 (Käss, 1998).

Em 1904 já se sabia que a uranina podia ser adsorvida por carvão ativado e ser posteriormente eluída (Käss, 1998). Esta propriedade foi ignorada durante algum tempo pelo que a prática comum era a colocação de grandes quantidades de traçador e esperar o seu aparecimento nas nascentes, à vista desarmada (White, 2007) ou com auxílio do fluoroscópio. A partir dos meados do século XX o carvão ativado começou a ser utilizado na absorção do traçador e a recuperação a ser feita com uma solução solvente alcalina (eluente). Käss (1998) sugere o eluente composto por 1:1 mistura de 2-propanol e 40% NaOH para recuperar a uranina. O espectro fluorescente do eluente depende da composição da amostra, da duração da exposição e duração da eluição (Smart & Simpson, 2002).

Geralmente a análise quantitativa do traçador presente na água é feita com recurso aos fluorómetros de filtros e espectralfluorómetro em laboratório (ver Käss, 1998) ou através de um fluorómetro de filtros portátil cuja medição é feita diretamente no local de amostragem. A empresa Turner Designs (turnerdesigns.com) foi pioneira no desenvolvimento dos fluorómetro de filtros portáteis nos meados dos anos 60. Mais tarde, Barczewski & Marschall (1990) desenvolveram o primeiro fluorómetro de filtros portátil em fibra ótica para a medição contínua do traçador em furos. Posteriormente, a Universidade de Neuchâtel (Suíça) desenvolveu vários fluorómetros (Schneegg & Doerfliger, 1997; Schneegg & Kennedy, 1998, Schneegg & Bossy, 2001) pouco dispendiosos e com grande sensibilidade. As vantagens dos fluorómetros portáteis passam pela aquisição e gravação dos dados no local evitando os sistemas automáticos de amostragem e os custos das análises laboratoriais. Em 2002, Schneegg apresentou o fluorómetro de campo constituído por 4 canais óticos que permite a medição em simultâneo da turbidez e de três traçadores fluorescentes. Cada canal tem uma fonte de luz com um espectro máximo de 370, 470 e 525 nm correspondendo aos picos de excitação do Tinopal CBS-X, da uranina e de uma molécula da família da rodamina (amidorodamina G, sulforodamina B ou rodamina WT) (Figura 5.1) com limites de deteção são bastantes semelhantes ao espectralfluorómetro de laboratório.

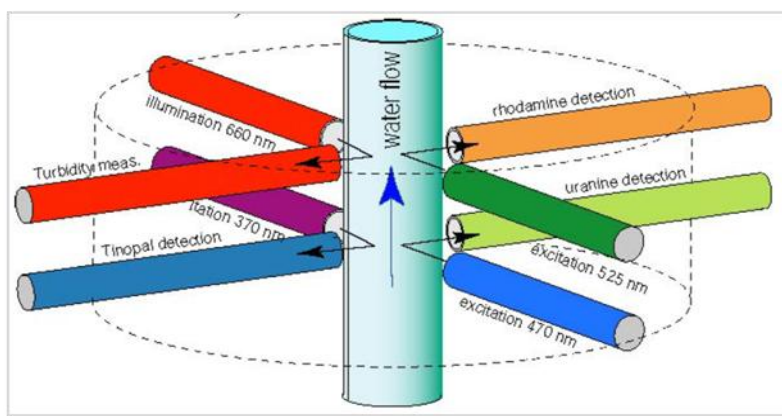


Figura 5.1 - Célula ótica (tubo de vidro) e quatro canais óticos e fotodetetores (in: Schnegg, 2002)

Cada traçador fluorescente apresenta o seu próprio espectro, ou seja, a sua absorção, a sua fluorescência (emissão) máxima, a diferença entre eles ($\Delta\lambda$) e a eficiência da fluorescência (a intensidade de absorção ou emissão). A presença de um determinado traçador na amostra observa-se pelo seu pico no espectro (comprimento de onda). A medição de intensidade da fluorescência engloba a contribuição de todos os componentes fluorescentes na amostra. Os traçadores podem ser facilmente separados na amostra desde que os seus picos de fluorescência sejam bem conhecidos. Contudo, a sobreposição de espectros nem sempre significa que o pico maior é o que apresenta maior concentração, pois concentrações muito elevadas de um determinado traçador podem mascarar concentrações mais baixas de outros. Nestes casos o espectro é decomposto manualmente ou com recurso a programas desenvolvidos para o efeito (Gutierrez et al., 2013; Schnegg, 2015).

5.3. Testes de traçagens com traçadores em partículas ou traçadores biológicos

Formam uma classe separada de traçadores, uma vez que não são solutos, mas sim uma suspensão de partículas submicroscópicas, que na água se comportam como partículas coloidais (Silva et al., 2009). Fazem parte dos traçadores por partículas ou biológicos os esporos coloridos, microsferas, bactérias específicas e os bacteriófagos (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 - Propriedades de alguns traçadores artificiais por partículas ou biológicos. (Adaptado de Benischke et al., 2007 e Behrens et al., 2001).

Traçadores Artificiais	Traçador Artificial	Fundo natural	Toxicidade	Outros problemas
Partículas ou Biológicos	Esporos coloridos	Ausente	Seguro	Partículas existentes no meio
	Microsferas	Ausente	Seguro	Partículas existentes no meio
	Bactéria específica	Ausente	Não avaliado	Outras bactérias
	Bacteriófagos	Ausente	Não avaliado	-

De entre os numerosos traçadores biológicos possíveis, os bacteriófagos apresentam-se como os mais vantajosos, por serem vírus de dimensões muito reduzidas, específicos para uma bactéria hospedeira e, geralmente, inócuos para qualquer outro organismo (Rossi, 1994). Os mais utilizados em estudos hidrogeológicos são de origem marinha, para evitar a existência da bactéria hospedeira nos aquíferos em estudo (Reis et al., 1998; Silva et al., 2009).

5.3.1. Bacteriófagos

As primeiras experiências de traçagens onde foram utilizados bacteriófagos foram levadas a cabo por Wimpenny e a sua equipa em 1972 (citado por Rossi, 1994), onde empregaram um fago de *Escherichia coli*, o fago λ , como traçador de um curso de água poluído. Desde então, vários trabalhos foram sendo realizados, nomeadamente nos aquíferos cársticos: Rossi (1994), Rossi et al., (1998), Daniell et al., (2000), Goldscheider et al., (2007), Pronk et al., (2009).

O termo bacteriófago ou fago é utilizado para designar um vírus bacteriano. Tal como todos os vírus, os bacteriófagos são incapazes de se multiplicarem sozinhos. Introduzem-se no metabolismo de um determinado hospedeiro, neste caso numa bactéria, e desviam-na em favor da sua multiplicação intercelular. Os bacteriófagos invadem exclusivamente e especificamente células de bactérias e adaptaram-se a todo o seu reino. A possibilidade de isolar, pelo menos, um fago para cada uma das bactérias conhecidas comprova a ubiquidade destes vírus (Rossi & Käss, 1998).

Os fagos apresentam dimensões de 20 a 350 nm, podendo atingir 1000 nm de comprimento. Fora da bactéria hospedeira são constituídos por uma molécula de ácido nucleico envolto numa cápside proteica (Rossi & Käss, 1998; Reis et al., 1998).

O uso dos bacteriófagos como traçador biológico tem sido resposta à necessidade crescente de ferramentas de investigação ambientalmente inofensivas, oferecendo algumas vantagens (Rossi & Käss, 1998): os fagos são não patológicos, não tóxicos e invisíveis, o que permite a utilização deste método em águas para consumo público; Cada fago geralmente só ataca uma espécie de bactéria. Se os fagos injetados não ocorrem naturalmente no aquífero, estes naturalmente vão desaparecer devido ao seu curto período de vida; O método clássico de análise para examinar os fagos nas amostras de água, usando agar sobre uma placa de Petri, é fácil e económico. O nível de deteção é de 1 fago por 2 mL de água; É também possível diferenciar e contar uma mistura de fagos numa amostra.

Rossi (1994) enumera algumas desvantagens na utilização dos bacteriófagos, nomeadamente, o tempo de sobrevivência do bacteriófago no aquífero ser limitado (3 a 8 semanas), permitindo apenas estudos em aquíferos com grandes velocidades ou com pequenas distâncias; a escolha do sistema bacteriófago/bactéria hospedeira (BBH) deve ter em conta a ausência da bactéria hospedeira no aquífero em estudo implicando assim testes prévios de despistagem daquela no meio; a suscetível

rápida degradação em ambientes com condições desfavoráveis (pH; temperatura); a fácil aderência a sais em suspensão promove a obtenção de falsos negativos.

5.3.2. Seleção do sistema bacteriófago/bactéria hospedeira (BBH) e preparação da suspensão de fagos

A seleção do sistema bacteriófago/bactéria hospedeira (BBH) é fulcral para todo o trabalho a realizar, pelo que as bactérias hospedeiras devem possuir determinadas características biológicas, nomeadamente, crescerem facilmente no meio líquido ou sólido; devem estar ausentes no meio a traçar. Se a bactéria hospedeira estiver presente no meio a traçar, o fago também estará; a estirpe da bactéria deve ser não patogénica, pois quando se produzem grandes quantidades de fagos é difícil eliminar todas as bactérias, pelo que algumas serão inevitavelmente injetadas no aquífero (Rossi & Käss, 1998).

A preparação é realizada em laboratório e consegue-se obter elevadas concentrações de bacteriófagos ou através de um fermentador (um recipiente para a cultura de bactérias a larga escala) ou através de frascos de vidro num agitador. Em ambos os casos, as características físico-químicas da cultura (pH, O₂) devem ser otimizadas para o rendimento máximo do bacteriófago (Käss & Rossi, 1998). Tal como todos os vírus, os bacteriófagos utilizam as bactérias hospedeiras para se multiplicarem através do ciclo lítico (Figura 5.2). A suspensão de fagos poderá ser armazenada por várias semanas a 4°C com um insignificante decréscimo na sua concentração (Käss & Rossi, 1998).

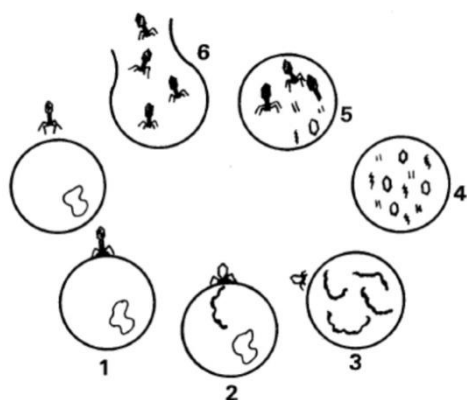


Figura 5.2 - Representação esquemática da reprodução de um bacteriófago através de um ciclo lítico (in: Reis et al., 1998).

Os fagos devem possuir a elevada capacidade de reprodutibilidade quando produzidos em meio líquido, pois é importante obter a sua maior quantidade no menor volume possível. A concentração mínima aceitável de uma cultura para injeção é de 10⁹ fagos/ml (Rossi & Käss, 1998). A inativação dos fagos é geralmente o primeiro processo que influencia a sua sobrevivência e propagação. O fago perde a sua capacidade de infetar a bactéria hospedeira e, por consequência, a possibilidade de se multiplicar, fenómeno também conhecido como “perda de virulência”. Existem vários fatores físico-

químicos que podem influenciar a perda de virulência dos fagos, tais como, a temperatura, as concentrações de H^+ e OH^- , a forte agitação mecânica, a existência de partículas coloidais no meio, entre outros. Na bibliografia, nomeadamente em Rossi (1994) ou Rossi & Käss (1998) encontram-se mais informações sobre este tema.

5.3.3. Detecção e enumeração dos bacteriófagos

As metodologias para a detecção e enumeração dos bacteriófagos podem ter por base, ou não, a bactéria hospedeira correspondente. Rossi & Käss (1998) apresentam várias metodologias para a detecção e enumeração dos bacteriófagos, independentemente da bactéria hospedeira, nomeadamente: o microscópio eletrónico, a reação em cadeia da polimerase (PCR - Polymerase Chain Reaction) e o método ELISA (Enzyme-Linked Immunosorbent Assay) utilizado em imunologia.

A detecção e enumeração dos fagos, utilizando a bactéria hospedeira, pode ser efetuada através da observação de placas de lise (PFU-“plaque forming units”) que se formam em culturas puras e densas, destas bactérias, em placas de Petri. Estas placas fágicas (PFU-“plaque forming units”) são pequenos círculos com um diâmetro que varia entre 5 a 10 mm, muito nítidos e transparentes, resultantes da lise das bactérias aí crescidas. O tamanho das PFU's é uma característica do sistema bacteriófago/bactéria hospedeira (sistema BBH) (Reis et al., 1998), característica que permite a realização de várias experiências de traçagens com diferentes bacteriófagos, em simultâneo. Adams (1959) e Rossi (1994) descrevem outras formas de detetar e enumerar os bacteriófagos.

5.4. Avaliação e interpretação

5.4.1. Qualidade dos dados, análise de erros e fundo

A aplicabilidade dos dados obtidos de uma experiência de traçagem depende da periodicidade de amostragem e dos procedimentos analíticos utilizados (Smart, 2005). A amostragem integrativa (p. e. carvão ativado ou resinas) fornecerá dados de acordo com o tempo de exposição. As medições em contínuo, por sua vez, fornecem uma melhor resolução temporal. Na prática, os erros nos testes de traçagens são dominados por questões relacionadas com o fundo e contaminação, perda de traçador (p.e. adsorção) e insuficiência na periodicidade de amostragem (Benischke et al., 2007). Smart (2005) e Meus (2008) fazem uma compilação dos principais erros detetados nos testes de traçagens, com traçadores fluorescentes, consoante a técnica utilizada.

O fundo pode ser definido como parte da concentração de traçador medido não proveniente da sua injeção, sendo resultado de traçadores externos (contaminação), outras substâncias medidas com o traçador ou erros instrumentais (Benischke et al., 2007). Vários autores apresentaram trabalhos nesta área, tentando caracterizar a proveniência do fundo: Smart & Simpson (2002); Smart & Karunaratne (2002); Meus et al., (2006). Alguns traçadores fluorescentes são hoje em dia

encontrados no meio ambiente, pelo facto de serem introduzidos pelo homem como resultado da sua atividade (p.e. na indústria automóvel ou detergentes domésticos). A utilização de bacteriófagos marinhos nas experiências de traçagens com traçadores biológicos ultrapassa esta questão na medida que a probabilidade da sua existência no aquífero é muito reduzida (Reis et al, 1998).

5.4.2. Curva de restituição, tempo de trânsito e velocidade

A curva de restituição relaciona a concentração do traçador no tempo obtido através de monitorização em contínuo ou das análises das amostras colhidas num determinado instante, representando assim o comportamento do traçador durante um determinado trajeto. A curva típica de restituição é composta por um troço ascendente, por um pico e por um troço descendente da curva (Figura 5.3). A sua assimetria deve-se a processos de transporte, como a dispersão. A curva de restituição reflete também a estrutura por onde o escoamento se processa e é influenciada pela variação temporal da recarga (Benischke et al., 2007).

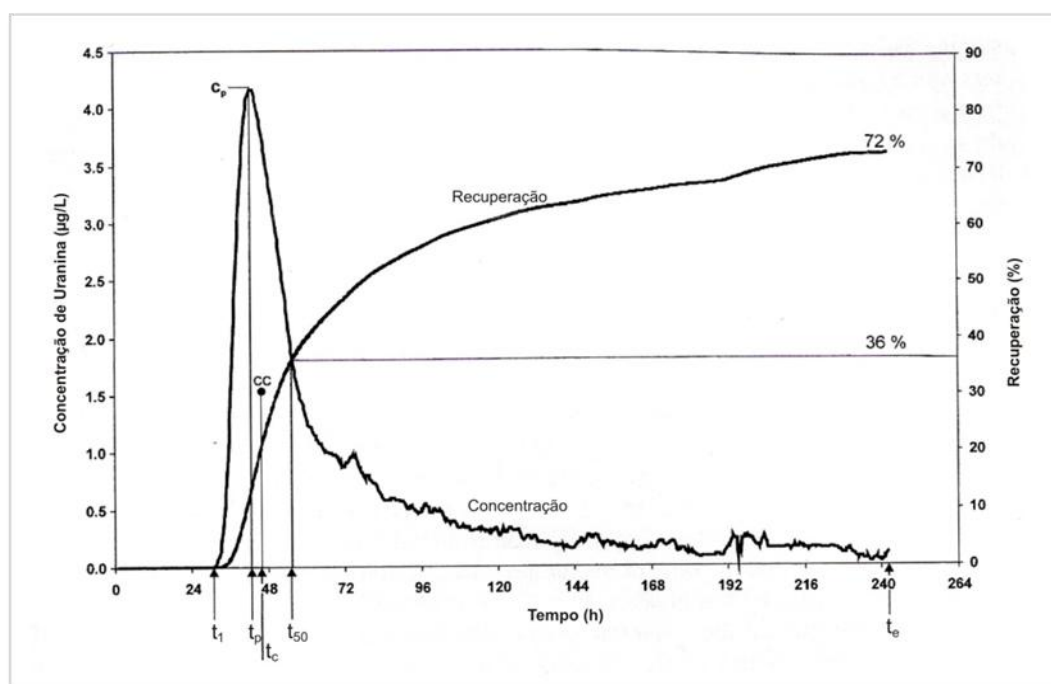


Figura 5.3 - Exemplo de uma curva de restituição resultante da injeção instantânea. As principais características são: tempo da primeira deteção (t_1), tempo e concentração do pico (t_p , C_p), tempo de concentração do centróide cc (t_c), tempo onde metade do traçador recuperado já passou (t_{50}), fim do período de observação (t_e). A curva de recuperação mostra cumulativamente a fração de traçador injetado que chegou. Neste caso, o total recuperado no final do tempo de observação foi de 72%, então o t_{50} é o tempo com 36% de recuperação (Adaptado Benischke et al., 2007).

O primeiro momento de chegada do traçador depende do limite de deteção do método utilizado e da estabilidade do fundo, pelo que é mais correto chamar-lhe primeira deteção. A média do tempo de trânsito situa-se entre o tempo máximo de concentração e o tempo em que 50% do traçador já passou o local de amostragem. O centróide da concentração da curva de restituição fornece uma boa

aproximação da média do tempo de trânsito. Quando a curva de restituição provém de uma amostragem deficiente ou com erros, o tempo do pico fornece a melhor estimativa do tempo de trânsito (Benischke et al., 2007). O tempo de trânsito pode ser convertido para a respetiva velocidade se for conhecida a distância percorrida (p. ex. através de exploração espeleológica) ou então a distância linear entre o ponto de injeção e de monitorização pode ser usado para calcular a velocidade linear. A velocidade de fluxo corresponde a diferentes tempos que são a velocidade máxima de fluxo (primeira deteção), a velocidade de fluxo modal (pico), a velocidade de fluxo efetiva (tempo do trânsito médio) e a velocidade média (50% da massa de traçador recuperado) (Schulz, 1998). Alguns programas de computador podem ajudar na interpretação das curvas de restituição como, por exemplo, o QTRACER (Field, 2002).

Para o cálculo da massa de traçador recuperado é necessário os valores do caudal assim como as concentrações em todos os locais monitorizados. É possível colocar os valores cumulativos de traçador recuperado (massa ou %) no mesmo diagrama da curva de restituição permitindo assim definir o tempo em que metade do traçador passou e calcular a velocidade média (Figura 5.3) (Benischke et al., 2007). A massa recuperada de traçador é frequentemente menor que 100% devido a vários fatores como, por exemplo, a sua chegada a locais não monitorizados (p.e. nascentes submarinas ou outras bacias de drenagem). Meus et al., (2006) apresentam vários motivos e possíveis consequências pela perda excessiva de traçador.

5.4.3. Caracterização da rede de galerias

A aplicabilidade primária de um teste de traçagem consiste na definição dos locais por onde o escoamento subterrâneo se faz preferencialmente. É possível obter as características hidráulicas da rede de galerias dos aquíferos cársicos com testes totalmente configurados onde a massa de traçador injetado e o caudal de injeção possam ser comparados com a massa de traçador recuperado e o caudal no local de amostragem. Os traçadores conservativos são preferenciais para este tipo de interpretação (Benischke et al., 2007).

Quando o caudal no ponto de injeção é similar ao caudal no ponto de amostragem e a massa de traçador recuperada é próxima dos 100%, então a conexão entre estes dois pontos é direta, sem divergência ou confluência de fluxo. Conceptualmente é útil determinar a geometria de uma galeria equivalente conectada por dois pontos, completamente cheia de água e com uma área da secção transversal constante (ver p.e. Benischke et al., 2007). Na maioria dos casos, o caudal no ponto de amostragem é diferente do caudal no ponto de injeção e a massa de traçador recuperado é inferior a 100%, indicando um fluxo divergente e/ou convergente entre os dois pontos.

A curva de restituição pode fornecer informações adicionais sobre as condições em que se processa o escoamento subterrâneo. Um único pico sugere uma única galeria que pode ser caracterizada

geralmente usando modelos interpretativos apropriados. Múltiplos picos na curva de restituição podem sugerir múltiplas direções de escoamento (Smart, 1988).

A combinação dos testes de traçagens com observações geológicas, hidrogeológicas (p.e. hidroquímica, isotópica) ou espeleológicas, tem ajudado à compreensão do escoamento subterrâneo: Goldscheider et al., 2008; Lauber et al., 2014; Pronk et al., 2006; Miller, 2010.

5.5. Testes de traçagens em Portugal, com traçadores artificiais

Em Portugal foram utilizados dois tipos de traçadores artificiais nos testes de traçagens: fluorescentes e biológicos. Os primeiros testes de traçagens com traçadores fluorescentes remontam aos anos 80 do século passado. O Planalto do Escarpão, a norte de Albufeira, foi o primeiro local onde se realizaram estas experiências (Almeida & Crispim, 1987), seguindo-se o Maciço de Sicó-Alvaiázere (Crispim, 1986a, 1987). O Maciço Calcário Estremenho é a região calcária onde foram traçados o maior número de eixos de escoamento subterrâneo com recurso a esta técnica: Crispim, 1986b, 1995; Crispim et al., 2007; Lopes et al., 2007. Na Serra da Arrábida foi traçado um eixo de circulação, apresentado no trabalho de Crispim et al., 2006.

Em relação aos testes de traçagens com traçadores biológicos, em aquíferos cársticos, apenas é conhecido o de Reis (2007) no sistema aquífero Querença-Silves (Algarve).

5.5.1. Testes em Portugal com traçadores fluorescentes

Planalto do Escarpão (Albufeira, Algarve)

A primeira experiência de traçagens com um traçador fluorescente foi realizada na Orla Meridional, no sistema aquífero M6 - Albufeira-Ribeira de Quarteira, no Planalto do Escarpão (Almeida & Crispim, 1987). Beneficiando da circulação ativa do Algarão do Escarpão, foram injetados em março 1980 e maio de 1984, 400 g e 2 kg de uranina, respetivamente. Antes já tinham sido colocados fluorocaptadores de carvão ativado em 4 locais diferentes. Nas duas experiências, foi inequívoca a presença do traçador num pego da Ribeira de Quarteira, situado 1,5 km a NE do Algarão do Escarpão, com velocidades médias entre os 15 m/h e 10 m/h. Os autores concluíram que as águas que circulam no Algarão do Escarpão são drenadas para norte, embora admitam que no planalto haja escoamento noutras direções.

Maciço de Sicó-Alvaiázere

No Maciço de Sicó-Alvaiázere foram realizadas várias experiências de traçagens na região de Ansião (Crispim, 1986a, 1987). No Algar da Póvoa, sumidouro localizado na depressão da Várzea da Póvoa (Chão de Ourique), foram introduzidos 2 kg de uranina aquando o seu funcionamento em janeiro de 1985. Foram colocados fluorocaptadores de carvão ativado em três nascentes em funcionamento: Olho

de Dueça, Fonte Carvalho e Olho de Ansião. Nos detetores dos três locais foi possível identificar um fundo de fluoresceína que pode indicar a chegada do traçador, sobretudo no caso do Olho do Dueça. Em fevereiro do mesmo ano foi realizada uma outra experiência de traçagem onde foi diluído 1 kg de uranina nas águas que se escoavam para o Sumidouro do Campo e colocados fluocaptos no Olho de Ansião, na Fonte Carvalho e no Olho Tordo. Nesta última, o detetor foi levado pela cheia e na Fonte Carvalho não se registou passagem do traçador. Alguns dos resultados obtidos para a ligação entre o Sumidouro do Campo e o Olho de Ansião estão na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Características das experiências de traçagens realizadas no Maciço de Sicó-Alvaiázere.

Eixo de Circulação	Distância (km)	Data	Massa e Traçador injetado	Tipo de amostragem	$V_m - V_M$ (m/h)
Algar da Póvoa - Olho do Dueça	2,4	Jan. 1985	2 kg Fluoresceína sódica	Carvão ativado	141 - 400
Algar da Póvoa - Fonte Carvalho	3,6				75 - 129
Algar da Póvoa - Olho de Ansião	6,9				113 - 173
Sum. do Campo - Olho de Ansião	2,1	Fev. 1985	1 kg Fluoresceína sódica	Carvão ativado	117 - 350

V_m : Velocidade média; V_M : Velocidade máxima

Estas experiências, embora preliminares, foram bastante concludentes para o entendimento das direções preferenciais de escoamento nos sectores a norte e este de Ansião comprovando a conexão entre os sistemas aquíferos de Sicó-Alvaiázere e o de Penela-Tomar.

Maciço Calcário Estremenho

Em vários sectores do Maciço Calcário Estremenho foram aplicados testes de traçagens de forma a caracterizar o escoamento: a região de Chão das Pias, o Polje de Minde, o sector do Setentrional do Planalto de S. Mamede e a plataforma de Aljubarrota.

Região de Chão das Pias

A região de Chão das Pias está sobranceira às nascentes do Lena e da Fórnea. Numa das vertentes da depressão com o mesmo nome, localiza-se o Algar da Arroteia que foi alvo de várias injeções de traçador por ter circulação ativa (Crispim, 1995). As nascentes da Fórnea, do Lena e do rio Alcaide, situados, em média, a 1, 2 e 3 km respetivamente do Algar da Arroteia, foram os locais de amostragem. Neste sector do maciço foram utilizados fluocaptos de carvão ativado apenas na traçagem preliminar (fev. 1985). Nos restantes testes foram empregues amostradores automáticos e, simultaneamente, amostragem manual. Observou-se (Tabela 5.4) que o Algar da Arroteia escoar as

suas águas apenas para uma das várias nascentes do Lena, sem distribuir águas por nascentes bem mais próximas (Crispim, 1995). É uma situação inesperada revelando uma circulação cársica por galerias independentes (Crispim, 2010).

Tabela 5.4 - Características das experiências de traçagens realizadas na região de Chão das Pias.

Situação Hidrológica	Eixo de Circulação	Data	Massa e Traçador	Tipo de amostragem	$V_m - V_M$ (m/h)
Trânsito velocidade média a elevada	Algar da Arroteia – Lena (Nas. Da Rib. De Cima)	Abr. 1990	4 kg Fluoresceína sódica	Amostrador automático e inquérito à população	14*
Trânsito velocidade lento	Algar da Arroteia – Lena (Nas. Da Rib. De Cima)	Mar./Abr. 1991	1 kg Fluoresceína sódica	Amostrador automático	7 - 11
Trânsito velocidade rápido	Algar da Arroteia – Lena (Nasc. Minhola do Maneta e Nas. Da Rib. De Cima)	Abr. 1993	3 kg Fluoresceína sódica	Amostrador automático / manual	61 - 68

*Velocidade provável; V_m : Velocidade média; V_M : Velocidade máxima

Para averiguar a proveniência das águas ruças que surgiam numa das nascentes do Lena (Crispim, 1995), em maio de 1997 foi efetuada a injeção artificial de fluoresceína no algar que funcionava como esgoto dos efluentes de um lagar de azeite na localidade de Serro Ventoso. As águas recolhidas, manualmente, no rio Lena comprovaram a comunicação entre estes dois pontos. Assim, neste sector o circuito das águas subterrâneas atravessa as falhas da Costa da Mendiga e percorrem o Jurássico inferior, formação supostamente impermeável, até chegarem à nascente do Lena (Crispim, 2010; informação oral em maio 2015).

Polje de Minde

O Polje de Minde é a área do Maciço Calcário Estremenho (MCE) com melhores características para a aplicação de testes de traçagens por beneficiar da proximidade a três nascentes importantes e conter sumidouros com escoamento concentrado no seu fundo (Crispim, 2010). A primeira experiência de traçagem aqui realizada decorreu na década de oitenta do século passado (Crispim, 1986b). Nos anos seguintes, e apesar de várias experiências falhadas, o Polje de Minde continuou a ser alvo de várias experiências de traçagens, em diferentes períodos do ano hidrológico e recorreu-se também à utilização de grutas e furos de captação para injeção dos traçadores ou seguimento da sua passagem ou chegada (Crispim, 1995; Crispim & Lopes, 2007; Lopes et al., 2007).

Eixo de descarga do Polje de Minde para as nascentes do bordo sul do MCE

Como pontos de injeção, Crispim (1986; 1995) utilizou nos testes de traçagens o Sumidouro da Pousia do Parramau e o Algar do Zé Lenha, ambos situados na zona sul do polje o primeiro junto à Costa de Minde e o segundo perto do bordo leste do polje. A amostragem foi feita nas três principais exsurgências daquele sector do MCE: nascente do rio Alviela, a nascente de Vila Moreira e a nascente do rio Almonda. As nascentes do rio Alviela e rio Almonda são exsurgências perenes e as mais caudalosas do MCE. A nascente de Vila Moreira é uma exsurgência temporária. O sumidouro Pousia do Parramau está distanciado da nascente do rio Alviela cerca de 8 km e da nascente de Vila Moreira 4 km. O Algar do Zé Lenha está distanciado da nascente de Vila Moreira e da nascente do rio Almonda, aproximadamente, 5 e 7 km, respetivamente.

Tabela 5.5 - Resumo das operações de traçagens com eixo de descarga do Polje de Minde para as nascentes do bordo do Maciço Calcário Estremenho.

Situação Hidrológica	Eixo de Circulação	Data	Massa e Traçador injetado	Tipo de amostragem	$V_m - V_M$ (m/h)
Cheia	Pousia do Parramau	Jan. 1986	9 kg Fluoresceína sódica	Carvão	162 - 306
	– Nas. Vila Moreira			ativado /	
	Pousia do Parramau – Nasc. rio Alviela			amostragem manual	144 - 456
Cheia	Algar Zé Lenha – Nas. Vila Moreira	Dez. 1989	2 kg Fluoresceína sódica	Amostrador	194 - 269
	Algar Zé Lenha – Nasc. rio Almonda			automático	241 - 375
Fim de Cheia	Algar Zé Lenha – Nas. Rio Almonda	Mar. 1990	8 kg Fluoresceína sódica	Amostrador automático	191 - 241
Cheia	Pousia do Parramau	Mar. 1991	6 kg Fluoresceína sódica	Amostrador automático	158 - 234
	– Nas. Vila Moreira				
	Pousia do Parramau – Nasc. rio Alviela				194 - 277
	Algar Zé Lenha – Nas. Vila Moreira		5 kg Rodamina sódica	/ manual	119 - 218
	Algar Zé Lenha – Nasc. rio Almonda				238 - 365

V_m : Velocidade média; V_M : Velocidade máxima

Com o conjunto de traçagens aqui efetuadas (Tabela 5.5) foi possível revelar uma difluência das águas escoadas pelo Polje de Minde para as bacias do Alviela e do Almonda, embora ainda não se compreenda como ocorre a divergência do fluxo. Também se comprovou que a falha da Costa de Minde, que põe em contacto formações carsificáveis do Jurássico médio e superior com rochas

margosas do Jurássico inferior, supostamente impermeáveis, não constitui barreira à circulação subterrânea (Crispim, 1986, 2010).

Eixo de circulação afluyente ao Polje de Minde

Nas traçagens, com eixo de circulação afluyente ao Polje de Minde, incluem-se as que se realizaram nas depressões periféricas do Mindinho e Covão do Coelho e na gruta situada na vertente nordeste (Tabela 5.6).

A traçagem efetuada na Gruta de Moinhos Velhos, situada a meio da vertente nordeste do polje, intersecta uma galeria com circulação ativa que só é possível de alcançar no fim da estiagem (Crispim, 1993; Crispim, 1995). A deteção do traçador no rio da Contenda, a cerca de 800 metros do ponto de injeção, e a sua ausência nas amostras recolhidas no Olho de Mira confirmaram a suspeita de que direção de escoamento se processa do quadrante norte para o quadrante sul.

O Algar da Lomba, situado na vertente sul da depressão do Covão do Coelho, dista da nascente do Regatinho cerca de 1,4 km. A massa total restituída do traçador foi perto de 100% e permitiu estimar galerias com 3 metros de diâmetro. A ausência de traçador na nascente do rio Almonda durante a amostragem antevê a necessidade em repetir esta traçagem noutros períodos hidrológicos (Crispim & Lopes, 2007).

Na depressão do Mindinho, situada no setor noroeste do Polje de Minde, dois sumidouros foram utilizados para injeção dos traçadores que se situam perto da gruta do Mindinho, a cerca de 1 km de distância do Olho de Mira. A massa total restituída não ultrapassa os 10% para os dois traçadores e os diâmetros médios calculados para as secções das galerias situam-se entre 7 e 9 metros. Com estes dados, os autores presumem que uma grande quantidade de água circula em profundidade, por galerias de grande diâmetro, e eventualmente atravessa a Falha da Costa de Minde que, tal como a sul, não constituirá, assim, barreira relativamente às circulações subterrâneas neste sector.

Tabela 5.6 - Resumo das operações de traçagens com eixo de circulação afluyente ao Polje de Minde.

Situação Hidrológica	Eixo de Circulação	Data	Massa e Traçador injetado	Tipo de amostragem	$V_m - V_M$ (m/h)
Fim de estiagem	Gruta Moinhos Velhos – Rio da Contenda	Out. 1989	4 kg Fluoresceína sódica	Amostrador automático	16*
Cheia	Algar da Lomba – Nascente do Regatinho	Nov. 2006	Rodamina	Fluorómetro de campo	106 - 197
Cheia	Mindinho (sum. central) – Nasc. Olho de Mira	Nov. 2006	0,6 kg Tinopal	Fluorómetro de campo	50 - 70
	Mindinho (sum. sul) – Nasc. Olho de Mira		0,6 kg Rodamina		50 - 55

*Velocidade estimada; V_m : Velocidade média; V_M : Velocidade máxima

Sector do Setentrional do Planalto de S. Mamede

A fim de averiguar se a laboração de uma pedreira podia comprometer a qualidade das águas da nascente do Lis, foi efetuada uma traçagem em nov. 2002. A injeção foi efetuada na localidade de Soutocico (freguesia de Arrabal – Leiria) nos sumidouros existentes na Ribeira de Abadia com fluoresceína. A amostragem foi efetuada com fluorómetro de campo e amostrador automático. Verificou-se que a circulação subterrânea se dirige para pequenas nascentes situadas logo abaixo no mesmo vale, não atingindo as nascentes do Lis (Crispim, 2010; informação oral em abril 2015).

Plataforma de Aljubarrota

A plataforma carsificada de Aljubarrota também foi alvo de um teste de traçagem, no âmbito da elaboração de um parecer sobre a suscetibilidade hidrogeológica e geomorfológica do Vale da Ribeira do Mogo (Alcobaça). Assim, a sul da localidade de Pedreiras (concelho de Porto de Mós), foram efetuados dois testes: dez. 2000 e fev. 2001. A injeção foi efetuada com fluoresceína no sumidouro (Algar do Covão) no vale da ribeira do Mogo e amostradas as nascentes de Chiqueda com recurso ao fluorómetro de campo e amostradores automáticos. O traçador reapareceu nas nascentes de Chiqueda, voltando a juntar-se à ribeira após um percurso subterrâneo (Crispim, 2010; informação oral em abril 2015).

Serra da Arrábida (Sesimbra)

No aquífero cársico Jurássico da cadeia da Arrábida, Crispim et al., 2006 realizaram uma experiência de traçagem com dois traçadores, entre as Terras do Risco e a Lapa dos Morcegos (Fojo), distanciados 1 km de distância e com 170 metros de desnível. As Terras do Risco constituem uma depressão, quase fechada, em cujos bordos são conhecidos quatro sumidouros. Em dezembro de 2005 foi injetado uranina nos três sumidouros do bordo norte e rodamina no sumidouro do bordo sul. A Lapa dos Morcegos foi monitorizada com auxílio de um fluorómetro de campo onde as águas foram monitorizadas para a uranina e rodamina e turvação. A primeira deteção de ambos os traçadores ocorreu cerca de 4 dias após a injeção. Verificou-se que a circulação entre os sumidouros a norte é mais rápida do que no percurso do sumidouro sul (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 - Características da experiência de traçagem efetuada entre as Terras do Risco e a Lapa dos Morcegos.

Eixo de Circulação	Distância (km)	Traçador injetado	V _m - V _M (m/h)
Terras do Risco (Sum. norte) - Lapa dos Morcegos	1	Fluoresceína sódica	7 - 11
Terras do Risco (Sum. sul) - Lapa dos Morcegos		Rodamina	4 - 8
V _m : Velocidade média; V _M : Velocidade máxima			

O tempo de residência da água no aquífero é superior ao avaliado para outros aquíferos cárnicos do jurássico português, talvez por se tratar de um aquífero costeiro.

5.5.2. Testes em Portugal com traçadores por partículas ou biológicos

Sistema aquífero Querença-Silves

Com vista ao aprofundamento do funcionamento hidráulico do sistema aquífero Querença-Silves, Reis (2007) efetuou dois ensaios de traçagens com bacteriófagos marinhos. Pretendeu-se determinar a velocidade de circulação da água subterrânea do aquífero, assim como esclarecer algumas questões relativas à conexão hidráulica entre o ponto de injeção (furo 595/212, situado em Aivados e Fontes), e os pontos de amostragem materializados pelas captações para abastecimento público 2D e 3A, situados na zona de Vale da Vila e as 3 nascentes de Estômbar (595/260, 595/262 e 595/271). O furo de injeção e as nascentes de Estômbar distam entre si cerca de 14 km.

O primeiro ensaio foi realizado em março de 2006, onde foram injetados 12 L de produção de fagos com uma concentração de $5,4 \times 10^9$ fagos/mL na captação 595/212. O traçador apenas foi detetado na nascente 595/271, ao fim de 11,03 dias, apresentando uma velocidade de 1,26 km/dia. Esta nascente situa-se à cota mais baixa e com maior caudal. A restituição máxima ocorreu 15,01 dias após a injeção. De acordo com as velocidades calculadas neste ensaio, o traçador deveria ter atingido o furo 2D antes de se terem iniciado as colheitas (59 h após a injeção). A fim de averiguar esta hipótese realizou-se um segundo ensaio, em junho 2006, com o mesmo ponto de injeção (furo 595/212) e com locais de amostragem os furos 2D e 3A. As amostragens iniciaram-se logo após a injeção e foram efetuadas durante 94h, com periodicidade de hora a hora. O traçador não foi detetado em nenhum dos pontos de amostragem.

Com estes resultados dos testes de traçagens, Reis (2007) infere que para esta velocidade de circulação (1,26 km/dia), a circulação deve realizar-se preferencialmente por galerias e que estas são independentes entre si.

5.6. Considerações finais

Nos aquíferos cárnicos a utilização de traçadores na definição de eixos de escoamento das águas subterrâneas ou na delimitação de bacias de alimentação de nascentes, entre outros, revelou-se uma técnica bastante útil. Até à atualidade, o traçador fluorescente mais utilizado em Portugal foi a fluoresceína sódica, empregue em 78% das experiências, seguindo-se a rodamina e tinopal com 17% e 5%, respetivamente. Em relação ao tipo de amostragem, denota-se a evolução na utilização desta técnica: primeiro foram os fluocaptadores de carvão ativado (Planalto do Escarpão, Maciço de Sicó-Alvaiázere e em duas operações no Maciço Calcário Estremenho), totalizando 30% do universo das traçagens. Iniciou-se a amostragem automática, utilizada na maioria dos trabalhos efetuados no

sector de Chão das Pias e Polje de Minde por Crispim (1995), constituindo 35% das amostragens realizadas. Todas as traçagens realizadas no século XXI utilizaram o fluorómetro de campo. A amostragem manual foi usada em apenas uma traçagem como único tipo de amostragem, embora tenha sido um complemento em vários testes.

A aplicação de testes de traçagens com traçadores artificiais permitiu revelar situações complexas e inesperadas nas regiões cársicas portuguesas, salientando-se o escoamento radial em região planáltica (Escarção); a circulação confluyente no Polje de Minde; o atravessamento de falhas (Serra Ventoso; Falha da Costa de Minde); a partilha de águas por nascentes próximas (nascente do Almonda e Alviela); o isolamento em eixos de circulação próximos (Chão das Pias; Aquífero Querença-Silves); a conexão hidráulica entre dois sistemas aquíferos (Sicó-Alvaiázere e Penela-Tomar). No entanto, ainda é necessário investir um esforço de investigação prolongado e com meios importantes em muitas regiões do país até se conseguir um quadro geral da circulação nos nossos aquíferos cársicos.

5.7. Referências Bibliográficas

- Adams, M. (1959). *Bacteriophages* (M. B. L. Library Ed.). London: Interscience Publishers.
- Aley, T. (2002). *Groundwater tracing handbook* (O. U. Laboratory's Ed.): Ozark Underground Laboratory's.
- Almeida, C., & Crispim, J. A. (1987). Traçagens com uranina no Algar do Escarção (Albufeira-Algarve). *ALGAR - Boletim da Sociedade Portuguesa de Espeleologia*, 1, 48.
- Barczewski, B., & Marschall, P. (1990). Development of a lighthfibre fluorometer for in-situ tracer concentration measurements *Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart*, 267-284.
- Behrens, H., Beims, U., Dieter, H., Dietze, G., Eikmann, T., Grummt, T., Hanisch, H., Henseling, H., Käss, W., Kerndorff, H., Leibundgut, C., Müller-Wegener, U., Rönnefahrt, I., Scharenberg, B., Schleyer, R. & Tilkes, F. (2001). Toxicological and ecotoxicological assessment of water tracers. *Hydrogeology Journal*, 9, 321-325. doi: 10.1007/s100400100126
- Benischke, R., Goldscheider, N., & Smart, C. (2007). Tracer techniques. In N. Goldscheider & D. Drew (Eds.), *Methods in Karst Hydrogeology* (pp. 147-170). Londres: Taylor & Francis/Balkema.
- Close, M., Stanton, G., & Pang, L. (2002). Use of rhodamine WT with XAD-7 resin for determining groundwater flow paths *Hydrogeology Journal*, 10, 368-376. doi: 10.1007/s10040-002-0202-z
- Crispim, J. A. (1986a). *Dinâmica Cársica da Região de Ansião*. (Dissertação apresentada no âmbito das provas de aptidão pedagógica e científica), Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Crispim, J. A. (1986b). Traçagens com Uranina em Minde. *2º Congresso Nacional de Geologia. Maleo*, 2(13), 16-17.
- Crispim, J. A. (1987). Circulação subterrânea na zona norte das serras de Ansião (Maciço de Sicó-Alvaiázere, Portugal). *Geolis*, 1, 92-99.
- Crispim, J. A. (1995). *Dinâmica cársica e implicações ambientais nas depressões de Alvados e Minde*. (Tese Doutoramento), Universidade de Lisboa, Lisboa.

- Crispim, J. A. (2010). O sistema aquífero do Maciço Calcário Estremenho: Características e importância das traçagens para o conhecimento da circulação subterrânea. *Tágides - Os Aquíferos das Bacias Hidrográficas do Rio Tejo e das Ribeiras do Oeste – Saberes e Reflexões*, 7, 158-166.
- Crispim, J. A., & Lopes, L. M. (2007). *Ligação hidrológica entre o Algar da Lomba e a nascente do Regatinho (Minde, Portugal)*. Artigo apresentado no Simpósio Ibero-Americano sobre Património geológico, arqueológico e mineiro em regiões cársicas, Batalha.
- Crispim, J. A., Lopes, L. M., Teixeira, E., Machado, J., & Monteiro, C. (2006). *Experiências de traçagem da circulação subterrânea nas Terras do Risco (Sesimbra, Arrábida)*. Artigo apresentado no VII Congresso Nacional de Geologia, Évora.
- Daniell, T. J., Davy, M. L., & Smith, R. J. (2000). Development of a genetically modified bacteriophage for use in tracing sources of pollution *Journal of Applied Microbiology*, 88, 860-869.
- Davis, S. N., Campbell, D. J., Bentley, H. W., & Flynn, T. J. (1985). *An introduction to ground-water tracers*. U. S. EPA.
- Davis, S. N., Campbell, D. J., Bentley, H. W., & Stiles, G. (1980). Ground-water tracers - A short review. *Ground Water*, 18, 14-23.
- Field, M. (2002). Efficient hydrologic tracer-test design for tracer-mass estimation and sample-collection frequency, 1. Method development *Environmental Geology*, 42, 827-838.
- Field, M. (2003). A review of some tracer-test design equations for tracer-mass estimation and sample-collection frequency *Environmental Geology*, 43, 867-881.
- Field, M., Wilhelm, R., Quinlan, J., & Aley, T. (1995). An Assessment of the potential adverse properties of fluorescent tracer dyes used for groundwater tracing. *Environmental Monitoring and Assessment*, 38, 75-96.
- Ford, D., & Williams, P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. West Sussex: Wiley & Sons.
- Goldscheider, N., Haller, L., Poté, J., Wildi, W., & Zopfi, J. (2007). Characterizing Water Circulation and Contaminant Transport in Lake Geneva Using Bacteriophage Tracer Experiments and Limnological Methods. *Environmental Science & Technology*, 41(15), 5252-5258. doi: 10.1021/es070369p
- Goldscheider, N., Meiman, J., Pronk, M., & Smart, C. (2008). Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *International Journal of Speleology*, 37(1), 27-40.
- Gutierrez, A., Klinka, T., Thiéry, D., Buscarlet, E., Binet, S., Jozja, N., Défarge, C., Leclerc, B., Fécamp, C., Ahumada, Y. & Elsass, J. (2013). TRAC, a collaborative computer tool for tracer-test interpretation. *EPJ Web of Conferences*, 50(03002), 8. doi: 10.1051/epjconf/20135003002
- Keswick, B., Wang, D.-S., & Gerba, C. (1982). The use of microorganisms as ground-water tracers: a review. *Ground Water*, 20(2), 142-149.
- Käss, W. (1998). *Tracing Technique in Geohydrology* (Metthess & Käss Eds.). Rotterdam: Balkema.
- Lauber, U., Ufrecht, W., & Goldscheider, N. (2014). Spatially resolved information on karst conduit flow from in-cave dye tracing. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 435-445. doi: 10.5194/hess-18-435-2014
- Leibundgut, C., Maloszewski, P., & Kulls, C. (2009). *Tracers in Hydrology*. (J. S. Ltd Ed. 1ª Edição ed.): JohnWiley & Sons Ltd.
- Lopes, L. M., Crispim, J. A., & Henriques, J. M. (2007). *Traçagem da circulação subterrânea entre a depressão do Mindinho e o Polje de Minde (Mira de Aire, Portugal)*. Artigo apresentado no Simpósio Ibero-Americano sobre Património geológico, arqueológico e mineiro em regiões cársicas, Batalha.

- hr/>
- Meus, P. (2008). *Uncertainties in the quantification and detection of fluorescent tracers in hydrogeology*. Paper presented at the Journée d'Etude du Comité belge des Hydrogéologues, Modave. <http://www.ewts.be/liens.htm>
- Meus, P., & Ek, C. (1999). *Tracing techniques as a contribution to karstology : past experiences, new directions*. Paper presented at the Nerja Cave Geology Symposium, Málaga (Espanha). <http://hdl.handle.net/2268/37432>
- Meus, P., Käss, W., & Schnegg, P. (2006). Background and detection of fluorescent tracers in karst groundwater. *Karst, climate change and groundwater. Hidrogeologia y Aguas Subterráneas*, 18, 65-75.
- Miller, B. (2010). *The Hydrology of the Carroll Cave-Toronto Springs System: Identifying and Examining Source Mixing through Dye Tracing, Geochemical Monitoring, Seepage Runs and Statistical Methods*. (Master of Science), Western Kentucky University, Bowling Green, Kentucky. Retrieved from <http://digitalcommons.wku.edu/theses/216> (216)
- Pronk, M., Goldscheider, N., & Zopfi, J. (2006). Dynamics and interaction of organic carbon, turbidity and bacteria in a karst aquifer system *Hydrogeology Journal*, 14, 473-484. doi: 10.1007/s10040-005-0454-5
- Pronk, M., Goldscheider, N., & Zopfi, J. (2009). Microbial communities in karst groundwater and their potential use for biomonitoring. *Hydrogeology Journal*, 17(1), 37-48.
- Reis, M. P., Baptista, R., & Coimbra, R. (1998). Vantagens da utilização de bacteriófagos marinhos como traçadores hidrogeológicos. *Recursos Hídricos*, 95, 21-24.
- Reis, E. (2007). Contribuição para o Cálculo do Balanço Hídrico dos Principais Sistemas Aquíferos do Algarve (pp. 41): Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional - Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional.
- Rossi, P. (1994). *Advances in biological tracer techniques for hydrology and hydrogeology using bacteriophages: Optimization of the methods and investigation of the behavior of bacterial viruses in surface waters and in porous and fractured aquifers*. (Doctor), University of Neuchatel, Neuchatel.
- Rossi, P., Dorfliger, N., Kennedy, K., Muller, I., & Aragno, M. (1998). Bacteriophages as surface and ground water tracers. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2(1), 101-110.
- Rossi, P., & Käss, W. (1998). Phages. In M. Käss (Ed.), *Tracing Technique in Geohydrology* (pp. 244-270). Roterdão, Holanda: Balkema.
- Savoy, L. (2008). *Use of natural and artificial reactive tracers to investigate the transfer of solutes in karst systems* (Tese Doutoramento), Université de Neuchatel, Neuchâtel.
- Schnegg, P. (2015). A Computer Method for Separating Hard to Separate Dye Tracers. *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*, 1, 123-130.
- Schnegg, P.-A. (2002). *An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement*. Paper presented at the XXXII IAH & ALHSUD Congress Groundwater and Human Development, Mar del Plata, Argentina. <http://members.unine.ch/pierre.schnegg//Publ/mardelp.pdf>
- Schnegg, P.-A., & Bossy, F. (2001). *Sonde for Downhole Measurement of Water Turbidity and Dye Tracer Concentration*. Paper presented at the New Approaches Characterizing Groundwater Flow, Munique. <http://members.unine.ch/pierre.schnegg//Publ/article.pdf>
- Schnegg, P.-A., & Doerfliger, N. (1997). *An expensive flow-through field fluorometer*. Paper presented at the 6th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media, La Chaux-de-Fonds, Suíça. <http://members.unine.ch/pierre.schnegg//Publ/uis97.pdf>

- Schnegg, P.-A., & Kennedy, K. (1998). *A new borehole fluorometer for double tracer tests*. Paper presented at the Mass transport in fractured aquifers and aquitards, Copenhagen. <http://members.unine.ch/pierre.schnegg//Publ/copenh.pdf>
- Schulz, H. D. (1998). Evaluation and interpretation of tracing tests. In M. Käss (Ed.), *Tracing Technique in Geohydrology* (pp. 341-378). Roterão, Holanda: Balkema.
- Silva, L., Donnici, C., Ayala, J., Freitas, C., Moreira, R., & Pinto, A. (2009). Traçadores: uso de agentes químicos para estudos hidrológicos, ambientais, petroquímicos e biológicos. *Quim. Nova*, 32(6), 1576-1585.
- Smart, C. (1988). Artificial tracer techniques for the determination of the structure of conduit aquifers. *Ground Water*, 26(4), 445-453.
- Smart, C. (2005). *Error and Technique in Fluorescent dye tracing*. Paper presented at the 10th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, San Antonio, Texas. [http://dx.doi.org/10.1061/40796\(177\)53](http://dx.doi.org/10.1061/40796(177)53)
- Smart, C., & Karunaratne, K. (2002). Characterisation of fluorescence background in dye tracing *Environmental Geology*, 42, 492-498. doi: 10.1007/s00254-001-0510-y
- Smart, C., & Laidlaw, I. M. S. (1977). An Evaluation of Some Fluorescent Dyes for Water Tracing. *Water Resources Research*, 13(1), 15-33.
- Smart, C., & Simpson, B. (2002). Detection of fluorescent compounds in the environment using granular activated charcoal detectors *Environmental Geology*, 42, 538-545.
- White, W. (2007). A brief history of karst hydrogeology: contributions of the NSS. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69(1), 13-26.
- Worthington, S., & Smart, C. (2003). *Empirical determination of tracer mass for sink to spring tests in Karst*. Artigo apresentado em Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts on Karst Huntsville, Alabama, United States. doi: 10.1061/9780784406984

Capítulo 6. Metodologias para Análise do Escoamento nos Aquíferos Cársicos

A anisotropia e heterogeneidade natural dos aquíferos cársicos dificultam a compreensão da estrutura e das propriedades hidráulicas destes meios. O conhecimento do funcionamento e interação entre os seus diferentes subsistemas é fundamental, não só para a exploração e gestão dos recursos hídricos existentes, mas também na sua proteção. De entre as várias metodologias apropriadas para quantificar e analisar o escoamento dos subsistemas cársicos, salientam-se os hidrogramas e quimiogramas de nascente e os ensaios de bombagem, que a seguir se desenvolvem.

6.1. Hidrograma de nascente

Todos os processos hidráulicos que ocorrem no aquífero cársico refletem-se em variações temporais no caudal da nascente. O gráfico do caudal da nascente *versus* tempo é referido como hidrograma de nascente e consiste numa sucessão de picos de cheia individuais em que cada um deles representa a resposta global do aquífero a um evento pluvioso (Figura 6.1).

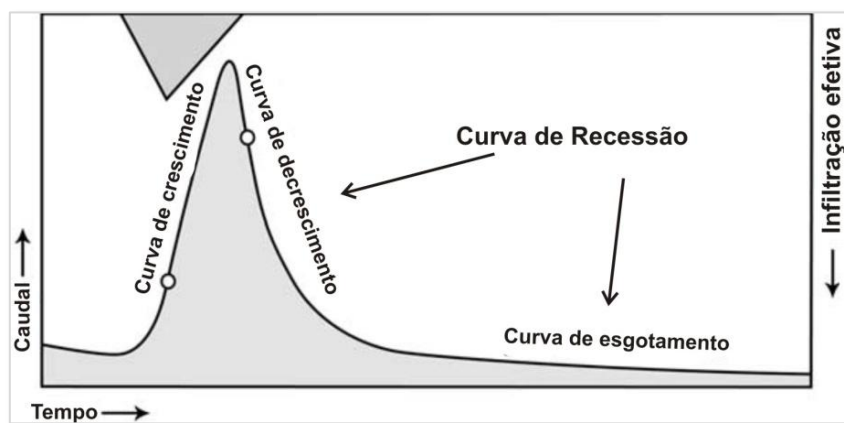


Figura 6.1 - Forma esquemática de um hidrograma de nascente. Os pontos brancos correspondem à infiltração máxima e ao fim da infiltração. O triângulo com vértice virado para baixo representa a precipitação. (in: Kovács et al., 2005).

A forma e declive da curva de recessão de um hidrograma de nascente (parte descendente da curva à direita de um pico de cheia, incluindo uma primeira parte muito inclinada, a curva de decrescimento, a que se segue uma parte menos inclinada, a curva de esgotamento) fornecem evidências do armazenamento e características estruturais do sistema aquífero que a alimenta. A análise das curvas de recessão oferece uma visão realista do funcionamento dos diferentes sistemas de drenagem, bem como o volume de armazenamento e estimativa de propriedades hidráulicas (Bonacci, 1993; Baedke & Krothe, 2001; Pinault et al., 2001; Doctor & Alexander, 2005). No entanto é importante reconhecer que a forma do hidrograma e da sua curva de recessão estão intimamente ligadas aos eventos de pluviosidade, nomeadamente à sua intensidade e duração. Outros fatores também deixam o seu cunho nomeadamente a dimensão e declive da bacia de drenagem, o tipo de recarga, a densidade da rede de drenagem, a variabilidade geológica, a vegetação e o solo (Milanović, 1981; Ford & Williams, 2007). Na Figura 6.2 observam-se exemplos de hidrogramas de nascente, incluindo o caso português dos Olhos de Água do Alviela.

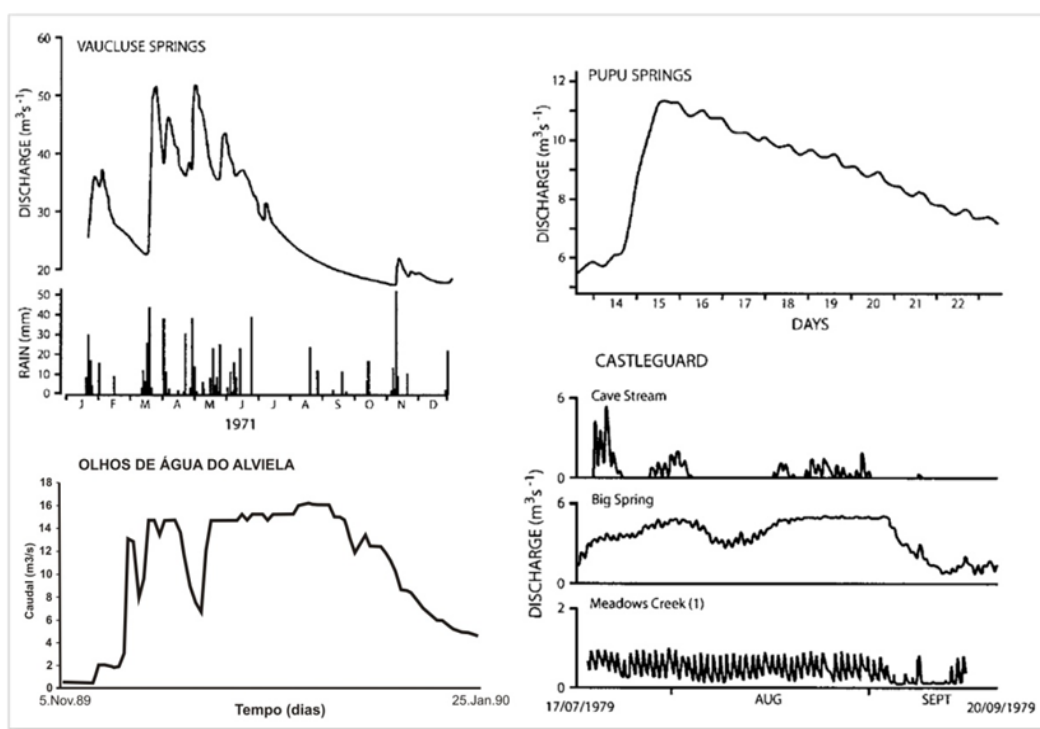


Figura 6.2 - Hidrogramas de nascentes cárlicas (in: Durozoy & Paloc, 1973; Williams, 1977; Smart, 1983; Crispim, 1995)

Os picos de cheia dos hidrogramas representam o armazenamento máximo do aquífero e depois de um longo período de recessão representam o armazenamento mínimo. A inclinação da curva de recessão indica a velocidade do escoamento da água armazenada no sistema. Assim a caracterização da pendente da curva de recessão e a sua previsão durante o período seco são importantes para a determinação do armazenamento e das reservas de água que podem ser exploradas no aquífero.

Jeannin & Sauter (1998) consideram que os sistemas cársicos não são lineares nem estacionários especialmente quando se considera a precipitação um *input* e o caudal da nascente um *output*. O sistema cársico é representado por um conjunto de reservatórios paralelos em que todos contribuem para o caudal da nascente e cada um deles com as suas características hidráulicas (Forkasiewicz & Paloc, 1967).

6.1.1. Análise da curva de recessão do hidrograma de nascente

Algumas técnicas de análise de hidrogramas são baseadas nos segmentos da curva de recessão do hidrograma (Maillet, 1905; Rorabaugh, 1964; Kovács, 2003; Kovács et al., 2005). Estes métodos são baseados nos princípios físicos que governam reservatórios simples e vazios e assumem que a curva de recessão do hidrograma reflete a drenagem da baixa permeabilidade da matriz entre blocos. Outros estudos descrevem todo o processo da curva de recessão ajustando uma série de curvas exponenciais a diferentes segmentos do hidrograma (Forkasiewicz and Paloc, 1967; Atkinson, 1977; Milanovic, 1976; White, 1988; Padilla et al., 1994; Shevenell, 1996; Baedke and Kroethe, 2001). Alternativamente há quem assuma parte da curva de recessão ajustável a uma exponencial (curva de esgotamento) e a restante a curva a uma equação não linear (Mangin, 1975) ou descrever toda a recessão por uma única fórmula matemática (Drogue, 1972). Adiante apresentam-se algumas das metodologias aplicáveis na análise da curva de recessão do hidrograma de nascente.

A análise quantitativa da recessão dos hidrogramas deriva dos trabalhos de Maillet (1905) propondo que o caudal da nascente é em função do volume de água armazenado. Maillet analisou os hidrogramas das nascentes em redor de Paris e descreveu a recessão de escoamento usando a exponencial:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

onde Q_t é o caudal (m^3/s) no tempo t , Q_0 é o caudal no instante zero, t é o tempo decorrido (normalmente expresso em dias) entre o Q_t e o Q_0 , e é um logaritmo neperiano e o α é denominado por coeficiente de recessão (T^{-1}).

A projeção num gráfico semi-logarítmico dos caudais que representam a recessão da nascente revela muitas vezes dois ou mais segmentos em que pelo menos um deles é linear, tornando possível adaptar uma equação aos dados de cada segmento. Milanović (1976) analisou o escoamento da nascente Ombla na Croácia, interpretando o escoamento como proveniente de três tipos de porosidade, representados por três coeficientes de recessão. Sugeriu que o coeficiente α_1 representa o escoamento proveniente das galerias com grande volume, que se esvaziam em 7 dias. O coeficiente α_2 representa as fissuras carsificadas e bem conectadas entre si, esvaziadas em 13 dias. O coeficiente α_3 representa o escoamento das reservas armazenadas nas fissuras, nos lagos e sifões suspensos e nos depósitos detríticos existentes nas galerias. Embora, por vezes, seja possível definir

apenas um valor para o coeficiente de recessão (α) que traduza a pendente da curva de regressão do hidrograma (Taylor & Greene, 2008) a situação mais comum é de, na curva de regressão do hidrograma, ser possível individualizar duas ou três retas e é vantajoso calcular para cada troço o valor correspondente ao coeficiente de recessão. É comum interpretar o primeiro troço da curva, pendor mais elevado, como o correspondente ao escoamento rápido das galerias. Muitas vezes este troço é seguido de outro menos íngreme, de pendente intermédia que é interpretado como representante da água proveniente das fissuras comunicantes e localmente bem carsificadas. A última alteração na inclinação da curva de recessão sinaliza o retorno às condições de base em que a água será proveniente das reservas localizadas nas fissuras, nos depósitos detríticos presentes nas galerias e nos lagos e sifões suspensos (Figura 6.3).

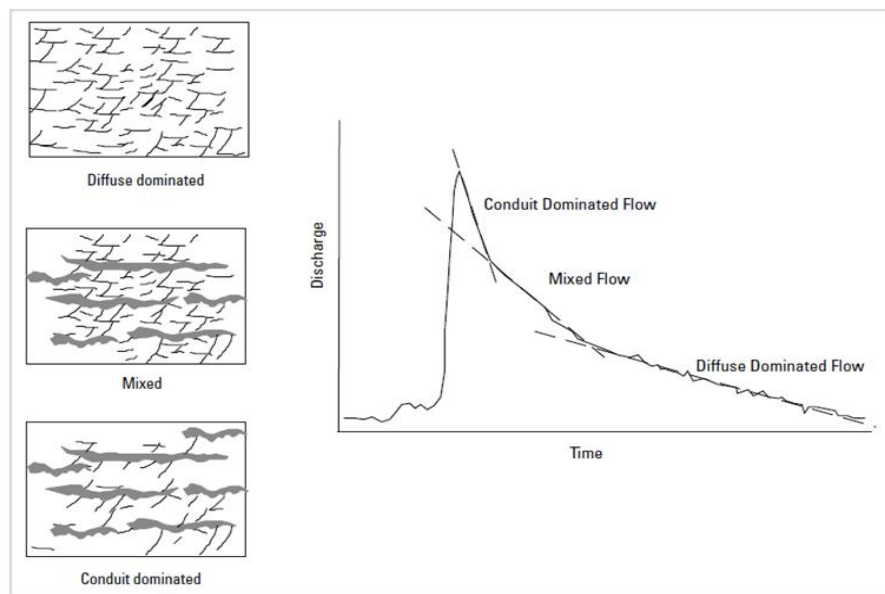


Figura 6.3 - Hidrograma de nascente conceptual em que se pode observa as pendentes dominantes em cada regime de escoamento (galerias, fraturas e matriz) provocando uma resposta hidráulica diferente. (in: Taylor & Greene, 2008)

Mangin (1975, 1998) considera os aquíferos cárlicos constituídos por dois subsistemas, a zona saturada e a zona não saturada, sendo no primeiro caso a recessão ajustada a uma equação exponencial da do tipo de Maillet ($\phi_{(t)}$), e no segundo caso o decrescimento é não linear e deve ser representada por uma função empírica ($\Psi_{(t)}$).

Assim a expressão proposta compreende duas funções:

$$Q_t = \phi_{(t)} + \Psi_{(t)}$$

Onde

$$\Psi_{(t)} = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 + \varepsilon t}$$

Em que q_0 é a diferença entre o caudal máximo da nascentes (no tempo t_0 , início do decrescimento), $\Psi_{(t)}$, é o caudal calculado para a componente do escoamento de base no início da recessão, designado também por Q_{RO} . Os coeficientes η e ε têm a dimensão (T^{-1}), sendo o primeiro designado por coeficiente de infiltração, indicando a duração de infiltração, e o segundo por coeficiente de heterogeneidade, traduzindo a importância da concavidade da curva de recessão.

No trabalho de Mangin (1975) o volume dinâmico (V_d) foi definido como o volume do carso saturado cujo escoamento determina as variações do caudal na nascente. Na Figura 6.4 podem-se observar as equações para a determinação do volume dinâmico (V_d) e do volume de infiltração (V_i).

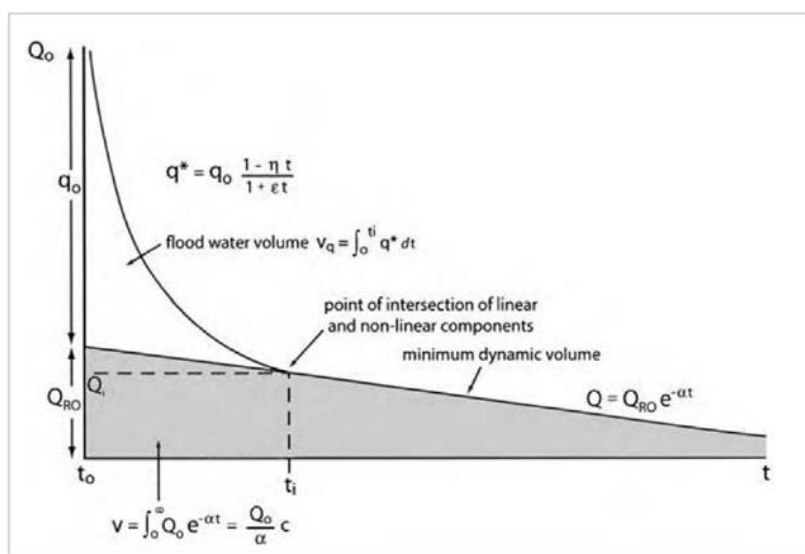


Figura 6.4 - Curva de recessão de uma nascente cársica interpretada de acordo com a metodologia de Mangin (1975, 1998). A área cinza representa o escoamento de base e a área não cinza a água da recarga.

Vários autores passam em revista as equações aplicáveis ao estudo dos hidrogramas de nascente (Jeannin & Sauter, 1998; Dewandel et al., 2003 e Fiorillo, 2014). Exemplos de aplicação são os trabalhos de Amit et al., (2002), Andreo et al., (2002), Malik (2007), Kovács & Perrochet (2008) ou Wicks (2013).

Em Portugal, na sua tese de doutoramento, Almeida (1985) fez a análise de curvas de esgotamento de várias nascentes no Algarve (Fontes, Benémola e Alte) calculando o coeficiente de esgotamento através da equação de Maillet. Mais tarde, Crispim (1995) apresenta a análise de vários hidrogramas de nascente dos Olhos de Água do Alviela (Maciço Calcário Estremenho) compreendidos entre os anos de 1945-1992. As curvas de recessão foram interpretadas com equações de vários autores, incluindo o método de Mangin aqui exposto, recorrendo ao uso de programas de computador apropriados.

6.2. Interpretação de quimiogramas de nascente

As variações de caudal na nascente são muitas vezes acompanhadas por variações na qualidade da água. A água que circula no sistema cárlico é dominada por um conjunto de parâmetros próprios do sistema (p.e. os bicarbonatos, a alcalinidade, a dureza total, o cálcio e o magnésio) e por parâmetros exteriores ao sistema cárlico (p. e. os cloretos, o sódio, o potássio, o sulfato e a sílica). A medição temporal da variação destes elementos fornece informações sobre o funcionamento do sistema e a sua combinação com a precipitação, o caudal, o pH, a condutividade elétrica e temperatura são fundamentais para os estudos hidroquímicos. Drake & Harmon (1973) foram alguns dos autores que aplicaram rigorosos métodos estatísticos na descrição da qualidade da água que emerge das nascentes cárlicas.

No seu trabalho, Hunkeler & Mudry (2007) referem que a forma do quimiograma pode refletir a organização e eficácia do sistema de drenagem (Figura 1.5). Um quimiograma com forma *achatada* reflete o baixo grau de carsificação do sistema cárlico que não consegue transferir à nascente o sinal de entrada da recarga (Figura 6.5 A). Tal sistema pode apresentar um bom sistema de fraturas mas no qual as condutas cárlicas estão ausentes. Um grande volume de armazenamento ou uma grande espessura de solo podem também contribuir para atenuar a resposta à precipitação. Um quimiograma com picos positivos e negativos indica uma rede de condutas eficazes em transmitir a infiltração até à nascente durante a recarga difusa e/ou infiltração concentrada (Figura 6.5 B). Também é possível fazer o mesmo tipo de análise mas com a distribuição da frequência da mineralização (Bakalowicz, 1977).

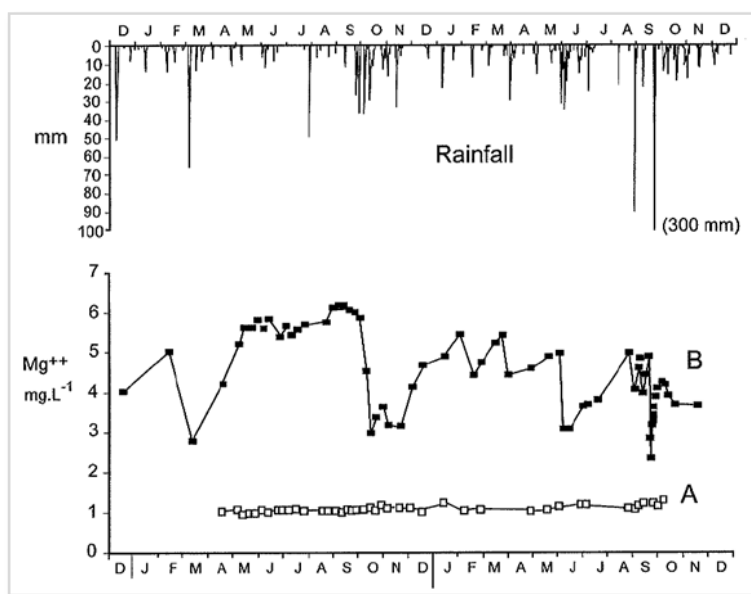


Figura 6.5 - Pluviosidade e variação da concentração de magnésio em duas nascentes cárlicas: A – as águas que emergem na nascente não refletem os eventos de pluviosidade pois a concentração de Mg mantém-se constante; B – reflete de forma nítida os eventos de pluviosidade através da variação da concentração de Mg das águas que emergem na nascente. (in: Hunkeler & Mudry, 2007).

A análise mais detalhada de um evento pluvioso pode fornecer informações adicionais sobre o tipo de água que surge na nascente e sua mistura. Worthington et al., (1992) in Ford & Williams (2007) analisaram dados de 39 nascentes em 6 países e demonstrou que mais de 75% da variação da dureza é explicada pelo tipo de recarga. Durante a fase inicial da recarga, a concentração nas águas da nascente dos parâmetros presentes no sistema cársico (Ca^{2+} , ^{18}O) podem manter-se constantes ou mesmo aumentar, indicando que a água mais mineralizada é forçada a sair do sistema, fenômeno denominado por efeito de pistão (Ashton, 1966). Mais tarde, estes parâmetros diminuem pela diluição da água da pré-recarga com a água da recarga, esta menos mineralizada. Frequentemente, a resposta dos diferentes reservatórios do aquífero à pluviosidade é acompanhada pela sobreposição de um padrão complexo da condutividade elétrica e da temperatura na nascente (Hess & White, 1988). O efeito de pistão torna-se mais claro quando os dados são colocados num gráfico em função do caudal e do tempo. Na Figura 6.6 pode-se observar vários efeitos de pistão na nascente dos Olhos de Água do Alviela no início do ano hidrológico de 1991.

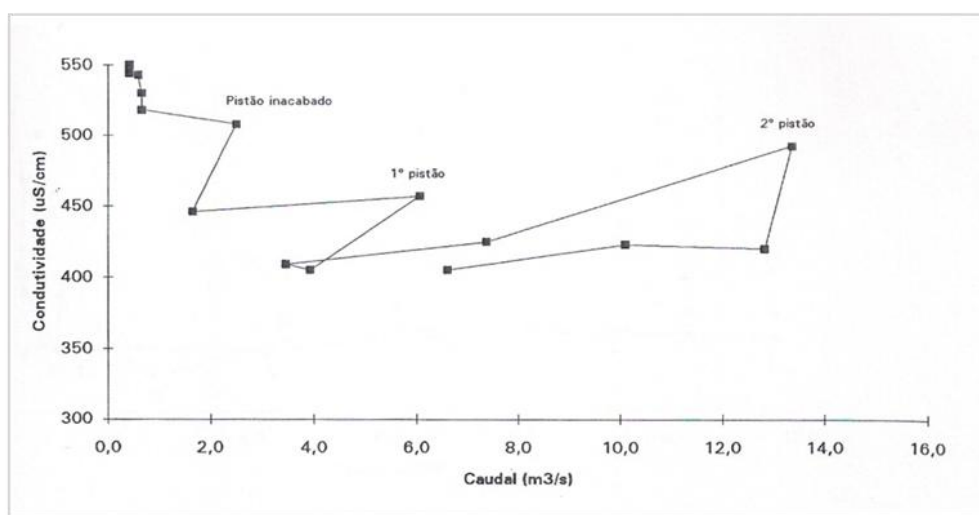


Figura 6.6 - Efeitos de pistão no ano hidrológico de 1991, na nascente dos Olhos de Água do Alviela. (in: Crispim, 1995).

A ocorrência e duração do efeito de pistão não está dependente apenas das características intrínsecas do sistema mas também da distribuição da precipitação, da rapidez da influência da precipitação na nascente, da quantidade de precipitação, do efeito da diluição e dos volumes e da composição química da água armazenada nos vários reservatórios. Por último ainda há uma dependência das condições climáticas anteriores ao evento pluvioso. O efeito de pistão é particularmente pronunciado depois de um longo período de seca (Hunkeler & Mudry, 2007).

Algumas características químicas da água que chega à nascente podem fornecer indicações relativas ao seu tempo de residência no sistema, nomeadamente a concentração de Mg^{2+} ou a razão Mg/Ca , os índices de saturação (SI), presença de ^{222}Rn , carbono orgânico dissolvido (DOC) ou o carbono

orgânico total (TOC) (Batiot et al., 2003; Lastennet & Mudry, 1997; Vesper & White, 2004; Barberá et al., 2013; Savoy et al., 2011). A água pode ser caracterizada através dos seus traçadores naturais ou antropogénicos, incluindo os isótopos, que não vão ser aqui expostos (Walker et al., 1989, Perrin et al., 2003; Criss et al., 2007).

Nos aquíferos cárlicos, o armazenamento ocorre nas condutas da zona saturada ou na zona subcutânea onde se inclui o epicarso. Estes reservatórios são drenados durante o esgotamento mas também são ativados no início do evento de pluviosidade como é ilustrado pelo efeito de pistão, pelo que a distinção entre estes reservatórios não deve ser descuidada (Hunkeler & Mudry, 2007).

No entanto é expectável que na zona batifreática as flutuações sazonais da concentração de CO₂ sejam pouco evidentes (Hess & White, 1993). Durante a estação seca a concentração de CO₂ no solo e no epicarso é superior à da zona batifreática. Assim, a chegada de água rica em CO₂ à nascente indica que o local de armazenamento da água foi próximo do solo (Savoy, 2008). As concentrações de CO₂ na água da nascente podem dar indicações do tipo de recarga: recarga do tipo concentrada irá provocar concentração de CO₂ mais baixa em comparação com água infiltrada de forma difusa através do solo. Adicionalmente, a evapotranspiração que ocorre durante o verão origina o aumento da concentração de Cl na água armazenada na zona subcutânea, pelo que um evento pluvioso durante a estação seca origina um pico de Cl.

A água que emerge na nascente é uma mistura de águas de diferentes reservatórios. Para separação dos dados do hidrograma e quimiograma de nascente é necessário que primeiro haja um modelo conceptual do sistema. Até à década de 1970 o epicarso não era reconhecido como capaz de armazenar água pelo que seu o armazenamento era negligenciado e o volume atribuído à zona freática era exagerado. Atualmente os dados são interpretados de modo a identificar a água proveniente da zona subcutânea. Assim pode ser feita uma tentativa para quantificar as contribuições de cada reservatório baseado em parâmetros químicos e isotópicos característicos de cada meio e que se revelem conservativos durante a mistura. Esta abordagem é denominada como a separação do hidrograma em equações para dois, três ou quatro componentes de mistura foram desenvolvidos por vários autores: Lakey & Krothe (1996); Lee & Krothe (2001, 2003); Meiman & Ryan (1999). A separação mais simples consiste na separação do hidrograma em água antes do evento de pluviosidade (com longo tempo de residência e alta mineralização) e água do evento de pluviosidade (água recentemente infiltrada, baixa mineralização). Os parâmetros mais comuns utilizados na separação do hidrograma são ¹⁸O e ²H da água, a sílica dissolvida e a alcalinidade.

Em Portugal, Crispim (1995) fez a decomposição do hidrograma utilizando a condutividade elétrica, considerando:

$$QC = q_M C_M + q_{ES} C_{ES}$$

Em que Q é o caudal da nascente, C a condutividade da nascente, q_M o caudal devido à matriz, C_M a condutividade da água proveniente da matriz, q_{ES} o caudal atribuído ao escoamento subterrâneo e o C_{ES} a condutividade das água que transitam nas condutas. Na Figura 6.7 pode-se observar a separação das componentes do hidrograma onde 78.4% do volume escoado na recessão de 1991 corresponde a águas com características próprias da matriz.

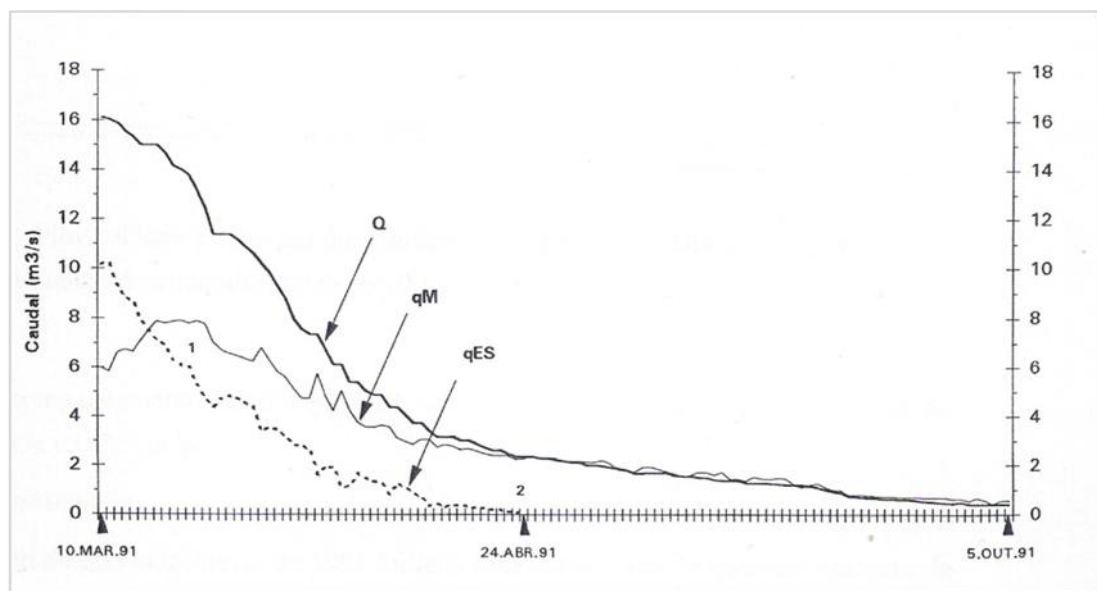


Figura 6.7 - Separação das componentes do hidrograma da recessão de 1991, na nascente dos Olhos de Água do Alviela: Q – caudal das nascentes; q_M – caudal atribuído à matriz; q_{ES} – Caudal atribuído ao escoamento subterrâneo. (in: Crispim, 1995).

6.3. Ensaios de bombeamento

Os ensaios de bombeamento são utilizados para quantificar alguns parâmetros hidráulicos dos aquíferos nas proximidades da captação em observação. Estes ensaios consistem na extração de água de um furo de captação, equipado com um dispositivo de extração (p.e. bomba elétrica submersível), e acompanhamento da evolução do nível de água na própria captação e/ou em furos de observação (piezómetros), ao longo do tempo. O ensaio pode ser realizado com caudal de extração sensivelmente constante (o que torna a interpretação mais simples) ou com caudal variável. A interpretação dos ensaios de bombeamento, quer em meios porosos quer em meios cársicos, faz-se pelo ajuste dos valores de tempo/rebaixamento a valores teóricos obtidos pela resolução das equações de fluxo adequadas ao aquífero em análise. Este tipo de solução é designado por resolução do problema inverso, onde a partir de dados experimentais procura-se conhecer os valores dos parâmetros hidráulicos do aquífero que lhes deram origem (Almeida et al., 1992; Kresic, 2007). Geralmente as equações que controlam o fluxo subterrâneo não têm resolução analítica direta, pelo que são feitas simplificações por forma a possibilitar essa resolução. Podem utilizar-se diversos

modelos analíticos, conjuntamente com ábacos e tabelas (modelos semi-analíticos), no sentido de simular localmente o escoamento subterrâneo.

A partir da equação geral de fluxo, numerosos autores têm proposto diversas técnicas analíticas para a interpretação de ensaios de bombeamento, com condições de aplicação diversas, resultantes das simplificações consideradas. Uma dessas simplificações consiste em considerar o regime permanente, aplicando o método de Thiem (1906), em que se assume não existir variação do potencial hidráulico com o tempo. No seu trabalho, Costa (2008) emprega esta metodologia numa das captações em estudo no aquífero da região de Moura.

Os vários métodos de interpretação de ensaios em regime transitório correspondem a diferentes técnicas de resolução da chamada *equação de Theis* (1935), que resulta da aplicação da equação geral de fluxo a um aquífero confinado ideal assumindo a homogeneidade, isotropia e extensão infinita do aquífero, um fluxo radial em regime laminar, a ausência de recargas exteriores, a penetração total da captação de diâmetro zero e caudal de bombagem constante. Os dados de rebaixamento/tempo são ajustados a “curvas tipo”, ou seja, a um modelo semi-analítico que permite determinar a transmissividade e coeficiente de armazenamento do aquífero através de dados de rebaixamento/tempo.

Vários foram os autores que tendo como base as equações de Theis (1935), com pequenas alterações e/ou correções, aplicaram as equações em aquíferos livres, nomeadamente, Jacob (1963) ou Moench (1993). Contudo, as condições naturais geralmente impedem a aplicação direta das equações de Theis, pelo que várias outras metodologias têm sido desenvolvidas, consoante a situação particular em estudo, nomeadamente na presença de aquíferos, poços de grande diâmetro ou efeito de *pele de poço* (Hantush & Jacob, 1955; Papadopoulos & Cooper, 1967; Boulton, 1973; Moench, 1984). Estas e outras metodologias encontram-se amplamente descritas na bibliografia: Ferris et al (1962), Stallman (1971), Kruseman & Ridder (2000), Almeida & Oliveira (1990) entre outros.

6.3.1. Particularidades da interpretação dos ensaios de bombeamento de furos em meios cársicos

Almeida (1985) apresenta a interpretação de vários ensaios de bombeamento, em aquíferos do tipo cársico do Algarve, cujo comportamento é, por vezes, próximo dos métodos clássicos e ao de Streletsova (1976). Por sua vez, Kresic (2007) apresenta vários gráficos comparativos da interpretação dos métodos de Theis (1935) e Cooper & Jacob (1946) que se afastam de um comportamento ideal de um aquífero confinado. Como consequência não fornece uma estimativa satisfatória dos parâmetros do aquífero: a transmissividade (T) e o coeficiente de armazenamento (S) (Figura 6.8). A diferença significativa entre resultados dos métodos mostra que para obter os valores dos

parâmetros mais representativos do sistema são necessárias investigações adicionais e análise hidrogeológica, incluindo ensaios de bombeamento mais longos e interpretação com métodos que tenham em consideração a dupla porosidade natural do aquífero.

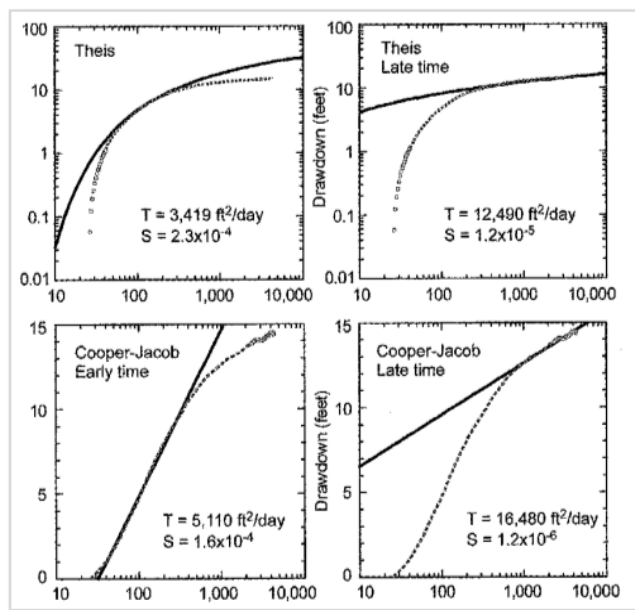


Figura 6.8 - Dados de tempo/rebaixamento do aquífero superior da Florida obtidos no piezômetro F1, utilizando as equações de Theis (1935) e Cooper & Jacob (1946). (in: Krevic, 2007).

A Figura 6.9 representa a resposta de um aquífero cársico a um ensaio de bombeamento, revelando a porosidade natural do aquífero. Num ensaio de bombeamento longo e na presença de todos os tipos de porosidade, a curva de tempo/rebaixamento irá revelar três troços de reta distintos (Kresic, 2007).

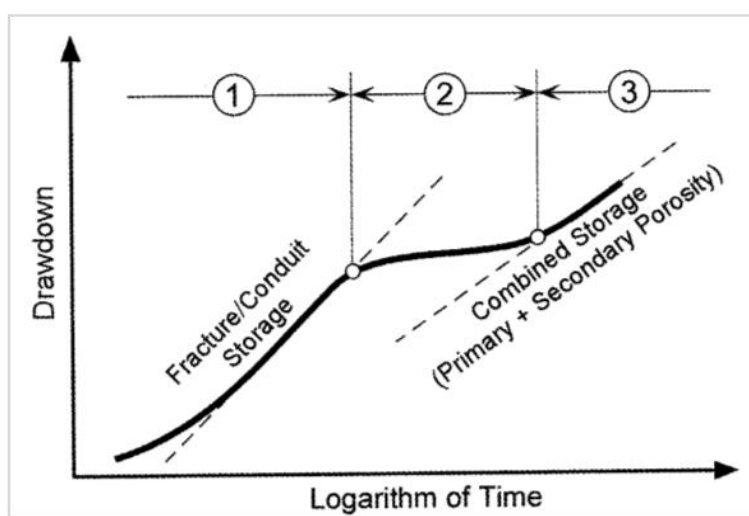


Figura 6.9 - Resposta teórica da curva tempo-rebaixamento ao efeito causado pela dupla porosidade presente nos aquíferos cársicos. (1) Rebaixamento provocado pelo escoamento da porosidade secundária (fraturas e condutas). (2) Rebaixamento de transição. (3) Rebaixamento provocado pelo estabilizar do escoamento de todos os tipos de porosidade presente no aquífero, incluindo a porosidade da matriz. (in: Kresic, 2007).

A primeira porção da curva, com declive constante, deve-se ao facto de as variações do potencial hidráulico se propagarem muito rapidamente a todo o sistema de fraturas devido a estas possuírem uma permeabilidade muito maior do que a dos blocos. Gera-se, assim, uma diferença de potencial entre os dois sistemas, com conseqüente início de percolação dos blocos para as fraturas, representada pelo achatamento da curva (parte 2). À medida que o ensaio prossegue o fluxo dos blocos torna-se predominante exibindo um declive uniforme (parte 3), aproximando-se de um comportamento de aquífero poroso.

Os dados mais tardios do teste de bombeamento são representativos de todo o aquífero. Na ausência de um longo período de observação é preferível que o ajustamento das curvas tipo seja feito aos últimos dados de rebaixamento do que a aproximação ao todo o conjunto de dados. A determinação exata das propriedades de armazenamento dos diferentes tipos de porosidade num aquífero cárlico vai para além da capacidade de um simples ensaio de bombeamento.

Dependendo da duração do ensaio de caudal e das características do aquífero cárlico em estudo a curva de rebaixamento pode exibir algumas alterações adicionais causados por fatores externos. Esses fatores podem incluir barreiras impermeáveis, áreas menos permeáveis do aquífero e condições de recarga, entre outros. Dada a natureza das propriedades de armazenamento dos sistemas cárlicos e as inevitáveis influências externas as curvas de rebaixamento dos ensaios de caudal mais longos exibem uma grande variedade de formas, frequentemente atípicas. Portanto, é fundamental que os ensaios sejam analisados utilizando os conhecimentos geológicos e hidrogeológicos do aquífero em estudo. Diferentes autores têm apresentado várias formas de interpretação dos ensaios de bombeamento em aquíferos cárlicos, consoante a situação particular em estudo, nomeadamente Thrailkill, 1988; Green et al., 1999; Maréchal et al., 2008; Renard et al., 2009; Lu et al., 2013.

Referências bibliográficas

- Almeida, C. (1985). *Hidrogeologia do Algarve Central*. (Tese de Doutoramento), Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Almeida, C., & Oliveira, M. (1990). Caracterização hidráulica de aquíferos fracturados. *Livro de Homenagem a Carlos Romariz*, 30-64.
- Almeida, C., Ribeiro, T., & Oliveira, M. M. (1992). Interpretação automática de ensaios de bombagem. *Geonovas, Número especial 3*, 64-82.
- Amit, H., Lyakhovsky, V., Katz, A., Starinsky, A., & Burg, A. (2002). Interpretation of Spring Recession Curves. *Ground Water*, 40(5), 543-551.

-
- Andreo, B., Carrasco, F., Bakalowicz, M., Mudry, J., & Vadillo, I. (2002). Use of hydrodynamic and hydrochemistry to characterise carbonate aquifers. Case study of the Blanca–Mijas unit (Málaga, southern Spain) *Environmental Geology*, 43, 108-119. doi:DOI 10.1007/s00254-002-0614-z
- Ashton, K. (1966). The analysis of flow data from karst drainage systems. *Transactions of the Cave Research Group of Great Britain*, 7, 161-203.
- Atkinson, T. C. (1977). Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in Mendip Hills, Somerset (Great Britain) *Journal of Hydrology*, 35, 93-100.
- Baedke, S. J., & Krothe, N. C. (2001). Derivation of effective hydraulic parameters of a karst aquifer from discharge hydrograph analysis. *Water Resources Research*, 37(1), 13-19.
- Bakalowicz, M. (1977). Etude du degre d'organisation des coulements souterrains dans les aquiferes carbonates par une methode hydrogochimique nouvelle *Aapg*, 284, 2463-2466.
- Barberá, J. A., Andreo, B., & Almeida, C. (2013). Using non-conservative tracers to characterise karstification processes in the Merinos-Colorado-Carrasco carbonate aquifer system (southern Spain) *Environ Earth Sci*. doi:10.1007/s12665-013-2754-8
- Batiot, C., Emblanch, C., & Blavoux, B. (2003). Carbone organique total (COT) et magnésium (Mg²⁺) : deux traceurs complémentaires du temps de séjour dans l'aquifère karstique. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(2), 205-214. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S1631-0713(03)00027-0
- Bonacci, O. (1993). Karst spring hydrographs as indicators of karst aquifers. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 38(1), 51-62.
- Boulton, N. S. (1973). The influence of delayed drainage on data from pumping tests in unconfined aquifers. *Journal of Hydrology*, 19, 157-169.
- Cooper, H. H., & Jacob, C. E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Am. Geophys. Union Trans.*, 27, 526-534.
- Costa, A. (2008). *Modelação matemática dos recursos hídricos subterrâneos da região de Moura*. (Tese de Doutoramento), Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Crispim, J. A. (1995). *Dinâmica cársica e implicações ambientais nas depressões de Alvados e Minde*. (Tese de Doutoramento), Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Criss, R., Davisson, L., Surbeck, H., & Winston, W. (2007). Isotopic methods. In N. Goldscheider & D. Drew (Eds.), *Methods in Karst Hydrogeology* (pp. 124-145). London: Taylor & Francis/Balkema.
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Bakalowicz, M., Weng, P., & Al-Malki, A. (2003). Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer. *Journal of Hydrology*, 274, 248-269.
- Doctor, D. H., & Alexander, E. C. (2005). Interpretation of water chemistry and stable isotope data from a karst aquifer according to flow regimes identified through hydrograph recession analysis. In E. L. Kuniansky (Ed.), *U.S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings* (pp. 82-92). Rapid City, South Dakota, September 12–15, 2005: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005–5160.
- Drake, J. J., & Harmon, R. S. (1973). Hydrochemical environments of carbonate terrains *Water Resources Research*, 9(4), 949-957.
- Droge, C. (1972). Analyse statistique des hydrogrammes de decrues des sources karstiques. *Journal of Hydrology*, 15, 49-68.
- Durozoy, G., & Paloc, H. (1973). Le regime des eaux de la fontaine de Vaucluse *Bureau de recherches gol. minières, Min. du Dev. Industriel et Scientifique* 31.
-

- Ferris, J. G., Knowless, D. B., Brown, R. H., & Stallman, R. W. (1962). Theory of aquifer tests. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper*, 1536-E, 69-174.
- Fiorillo, F. (2014). The Recession of Spring Hydrographs, Focused on Karst Aquifers *Water Resources Management*, 28, 1781-1805. doi:10.1007/s11269-014-0597-z
- Ford, D., & Williams, P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. West Sussex: Wiley & Sons.
- Forkasiewicz, J., & Paloc, H. (1967). Le regime de tarissement de la Foux-de-la-Vis [Analysis of the recession period of the Foux-de-la-Vis spring]. Etude preliminaire. *Chronique d'Hydrogeologie, BRGM*, 3(10), 61-73.
- Green, E. A., Shapiro, A. M., & Carter, J. M. (1999). *Hydrogeologic Characterization of the Minnelusa and Madison Aquifers near Spearfish, South Dakota*. Rapid City, South Dakota: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 93-4008.
- Hantush, M. S., & Jacob, C. E. (1955). Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Am. Geophys. Union Trans.*, 36, 95-100.
- Hess, J. W., & White, W. B. (1988). Storm response of the karstic carbonate aquifer of southcentral Kentucky. *Journal Hydrogeology*, 99, 235-252.
- Hess, J. W., & White, W. B. (1993). Groundwater geochemistry of the carbonate karst aquifer, southcentral Kentucky, U.S.A. *Applied Geochemistry*, 8(2), 189-204. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0883-2927(93)90034-E
- Hunkeler, D., & Mudry, J. (2007). Hydrochemical methods. In N. Goldscheider & D. Drew (Eds.), *Methods in Karst Hydrogeology* (pp. 93-121). London: Taylor & Francis/Balkema.
- Jacob, C. E. (1963). Corrections of drawdown caused by a pumped well tapping less than the full thickness of an aquifer. *US Geological Survey Water Supply Paper*, 1536-I, 272-292.
- Jeannin, P.-Y., & Sauter, M. (1998). Analysis of karst hydrodynamic behaviour using global approaches : a review. *Bulletin d'Hydrogeologie*, 16, 31-48.
- Kovács, A., & Perrochet, P. (2008). A quantitative approach to spring hydrograph decomposition. *Journal of Hydrology*, 352(1), 16-29.
- Kovács, A., Perrochet, P., Kiraly, L., & Jeannin, P. Y. (2005). A quantitative method for the characterisation of karst aquifers based on spring hydrograph analysis. *Journal of Hydrology*, 303(1-4), 152-164.
- Kovács, A. (2003). *Geometry and hydraulic parameters of karst aquifers: A hydrodynamic modeling approach*. (PhD thesis), University of Neuchâtel, Switzerland.
- Kresic, N. (2007). Hydraulic methods. In N. Goldscheider & D. Drew (Eds.), *Methods in Karst Hydrogeology* (pp. 65-92). London: Taylor&Francis/Balkema.
- Kruseman, G. P., & Ridder, N. A. (2000). *Analysis and evaluation of pumping test data (2nd edition)*. Wageningen, the Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Lakey, B., & Krothe, N. C. (1996). Stable isotopic variation of storm discharge from a perennial karst spring, Indiana *Water Resources Research* 32(3), 721-731.
- Lastennet, R., & Mudry, J. (1997). Role of karstification and rainfall in the behavior of a heterogeneous karst system *Environmental Geology*, 32(2), 114-123.
- Lee, E. S., & Krothe, N. C. (2001). A four-component mixing model for water in a karst terrain in south-central Indiana, USA. Using solute concentration and stable isotopes as tracers. *Chemical Geology*, 179(1-4), 129-143. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00319-9

-
- Lee, E. S., & Krothe, N. C. (2003). Delineating the karstic flow system in the upper Lost River drainage basin, south central Indiana: using sulphate and $\delta^{34}\text{SO}_4$ as tracers. *Applied Geochemistry*, 18(1), 145-153. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00067-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00067-7)
- Lu, C., Shu, L., Wen, Z., & Chen, X. (2013). Interpretation of a short-duration pumping test in the mixed flow karst system using a three-reservoir model. *Carbonates Evaporites*, 28, 149-158. doi:10.1007/s13146-013-0130-0
- Maillet, E. (1905). *Essais d'Hydraulique souterraine et fluviale [Underground and river hydrology]*. Paris: Hermann.
- Malik, P. (2007). Assessment of regional karstification degree and groundwater sensitivity to pollution using hydrograph analysis in the Velka Fatra Mts., Slovakia *Environmental Geology*, 51(5), 707-711.
- Mangin, A. (1975). Contribution a l'étude hydrodynamique des aquiferes karstiques [A contribution to the study of karst aquifer hydrodynamics]. 3ème partie. *Annales et Speleologie* 30(1), 21-124.
- Mangin, A. (1998). L'approche hydrogéologique des karsts. *Spéléochronos*, 9, 3-26.
- Maréchal, J., Ladouche, B., Dorfliger, N., & Lachassagne, P. (2008). Interpretatio of pumping tests in a mixed flow karst system. *Water Resources Research*, 44(W05401), 18. doi:10.1029/2007WR006288
- Meiman, J., & Ryan, M. T. (1999). The development of basinscale conceptual models of the active-flow conduit system In A. N. Palmer, M. V. Palmer, & I. D. Sasowsky (Eds.), *Karst Modeling* (Vol. Special Publication 5, pp. 203-212). Charles Town: Karst Waters Institute
- Milanović, P. T. (1976). Water regime in deep karst—Case study of the Ombla Spring drainage area. In V. Yevjevich (Ed.), *Karst hydrology and water resources, Proceedings of the U.S.-Yugoslavian Symposium, Dubrovnik, 1975* (pp. 165-191). Littleton, Colo.: Water Resources Publication.
- Milanović, P. T. (1981). *Karst hydrogeology*. Littleton, Colo.: Water Resources Publication.
- Moench, A. F. (1984). Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resources Research*, 21, 1121-1131.
- Moench, A. F. (1993). Computation of type curves for flow to partially penetrating wells in water-table aquifers. *Ground Water*, 31, 996-971.
- Padilla, A., Pulido-Bosh, A., & Mangin, A. (1994). Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring *Ground Water*, 32, 267-277.
- Papadopulos, I. S., & Cooper, H. H. (1967). Drawdown in a well os large diameter. *Water Resources Research*, 3, 241-244.
- Perrin, J., Jeannin, P.-Y., & Zwahlen, F. (2003). Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland. *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 106-124. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00171-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00171-9)
- Pinault, J. L., Plagnes, V., Aquilina, L., & Bakalowicz, M. (2001). Inverse modeling of the hydrological and hydrochemical behavior of hydrosystems—Characterization of karst system functioning. *Water Resources Research*, 37(8), 2191-2204.
- Renard, P., Glenz, D., & Mejias, M. (2009). Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeology Journal*, 17, 589-600. doi:10.1007/s10040-008-0392-0
- Rorabaugh, M. I. (1964). Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow. *U. S. Geological Survey, Publication n.º 63*, 432-441.
-

- Savoy, L. (2008). *Use of natural and artificial reactive tracers to investigate the transfer of solutes in karst systems* (Tese Doutorado), Université de Neuchâtel, Neuchâtel.
- Savoy, L., Surbeck, H., & Hunkeler, D. (2011). Radon and CO₂ as natural tracers to investigate the recharge dynamics of karst aquifers. *Journal of Hydrology*, 406(3–4), 148-157. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.031>
- Shevenell, L. (1996). Analysis of well hydrographs in a karst aquifer: estimates of specific yields and continuum transmissivities. *Journal of Hydrology*, 174(3–4), 331-355. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02761-0](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(95)02761-0)
- Smart, C. C. (1983). The Hydrology of the Castleguard Karst, Columbia Icefields, Alberta, Canada. *Arctic and Alpine Research*, 15(4), 471-486. doi:10.2307/1551234
- Stallman, R. W. (1971). Aquifer-test, design, observation and data-analysis. *U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3*(Chap. B1), 26.
- Streltsova, T. D. (1976). Hydrodynamics of Groundwater flow in fractured formations. *Water Resources Research*, 12(3), 405-414.
- Taylor, C. J., & Greene, E. A. (2008). Hydrogeologic Characterization and Methods Used in the Investigation of Karst Hydrology. In D. Rosenberry & J. LaBaugh (Eds.), *Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water* (pp. 75-107). Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 4–D2.
- Theis, C. V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Transactions American Geophysical Union*, 16, 519-524.
- Thiem, G. (1906). *Hydrologische methoden*. Leipzig: Gerbhardt.
- Thraillkill, J. (1988). Drawdown interval analysis: A method of determining the parameters of shallow conduit flow carbonate aquifers from pumping tests. *Water Resources Research*, 24(8), 1423-1428.
- Vesper, D. J., & White, W. B. (2004). Storm pulse chemographs of saturation index and carbon dioxide pressure: implications for shifting recharge sources during storm events in the karst aquifer at Fort Campbell, Kentucky/Tennessee, USA *Hydrogeology Journal*, 12(2), 135-143. doi:10.1007/s10040-003-0299-8
- Walker, F. W., Parrington, J. R., & Feiner, F. (1989). *Nuclides and Isotopes (14th ed)*. San Jose, California: General Electric Co.
- White, W. B. (1988). *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. New York: Oxford University Press.
- Wicks, C. M. (2013). SPRING DISCHARGE RECORDS - A CASE STUDY. *HIDROGRAMI KRAŠKIH IZVIROV: ŠTUDIJA NA PRIMERU IZVIRA DEVILS ICEBOX (MISSOURI, ZDA)*. 42(2/3), 339-346.
- Williams, P. W. (1977). Hydrology of the Walkoropupu Springs: A major tidal karst resurgence in northwest Nelson (New Zealand). *Journal of Hydrology*, 35(1–2), 73-92. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(77\)90078-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(77)90078-6)

Capítulo 7. Caso prático: A Captação do Olho de Mira (Maciço Calcário Estremenho)

A análise da variação do nível de água no poço da captação do Olho de Mira, com auxílio de algumas das metodologias aplicadas ao estudo do escoamento em aquíferos cárnicos, é o exemplo prático do presente trabalho. Este é iniciado com o enquadramento geológico, geomorfológico e hidrogeológico do Maciço Calcário Estremenho, seguindo-se o enquadramento da nascente e captação do Olho de Mira, quer do ponto de vista histórico pela importância que tem representado para as populações locais, quer pelos trabalhos já aí efetuados. Posteriormente é avaliada a influência da precipitação na variação do nível de água no poço, é calculada a transmissividade a partir dos rebaixamentos provocados pelas bombas em extração para abastecimento público e analisada a curva de recessão do último pico de cheia registado. Algumas questões pertinentes são equacionadas, direcionando assim futuros trabalhos.

7.1. Maciço Calcário Estremenho

O Maciço Calcário Estremenho constitui uma unidade geomorfológica definida e individualizada acima da cota dos 200 m, onde as formas cárnicas assumem aspetos bem característicos e espetaculares (Fernandes Martins, 1949). As rochas que afloram no Maciço Calcário Estremenho são sobretudo os termos do Jurássico (calcários, dolomitos, calcários margosos e margas), ocorrendo também em menor extensão os sedimentos do Cretácico e do Oligocénico e outros mais recentes (Zbyszewski & Almeida, 1960; Camarate França & Zbyszewski, 1963; Zbyszewski et al., 1971; Zbyszewski et al., 1974, Manuppella et al., 1985, 2000).

O Maciço Calcário Estremenho é constituído por blocos separados por falhas que segmentam a Bacia Lusitânica. Esses blocos foram desnivelados ainda durante a distensão (falhas normais), por

movimentos diapíricos e por compressões resultantes da passagem de regime distensivo a compressivo durante as várias fases da orogenia alpina (Terrinha et al., 2000).

Assim o Maciço Calcário Estremenho está individualizado em três blocos elevados: a Serra dos Candeeiros, o Planalto de Santo António e a Serra de Aire e Planalto de S. Mamede. O bloco elevado do Planalto de Santo António está limitado a oeste pela falha da Costa da Mendiga, com direção NNE-SSW, e a leste pelas falhas da Costa de Alvados e da Costa de Minde com direção próxima de NW-SE. A estrutura geral do bloco de Santo António está basculada para sudoeste, com a extremidade norte levantada, o que favorece o aparecimento do Jurássico inferior nesta área (Crispim, 1993). A oeste deste bloco elevado situa-se o bloco abatido da Mendiga e a leste o bloco abatido de Alvados-Minde que se liga a oriente com o bloco elevado de S. Mamede e Serra de Aire através da falha de Vale de Barreiras. A sul, estes blocos contactam com os sedimentos da Bacia do Baixo Tejo por acidentes cavalgantes (falhas do Arrife).

No planalto de Santo António, o topo dos cabeços define uma superfície de iso-altitudes a cotas de 500 a 590 m, designado por “nível das Pias”, que inicialmente foi identificado no Planalto de S. Mamede (Fernandes Martins, 1949). O exocarso é representado pelas grandes depressões fechadas, por campos de lapiás de várias géneses (Rodrigues, 2012), inúmeras pequenas dolinas e vales cegos e vales secos. São conhecidas numerosas lapas e algares, alguns dos quais com profundidades próximas da centena de metros (Fleury, 1940; Machado & Machado, 1948; Canais & Fernandes, 1999). De modo geral, mesmo os mais profundos como os do Ladoeiro, da Pena Traseira e da Manga Larga, com cerca de 150 metros e o Alecrineiros sul que ultrapassa as duas centenas de metros, não atingem galerias com circulação ativa (Crispim, 2000; Compan, 2008).



Figura 7.1 - Inundação periódica do Polje de Minde em fevereiro 2014. Em último plano observa-se a vertente sudoeste do planalto de S. Mamede e a povoação de Mira de Aire.

O Polje de Minde é uma depressão cárstica fechada de dimensão quilométrica com 4 km de comprimento por 1,5 km de largura no seu fundo plano regularizado à cota dos 195 m. Para norte, outras depressões fechadas situam-se no mesmo alinhamento, escalonadas em altitude (Mindinho e Chão Mindinho). É enquadrado a ocidente pela imponente escarpa de falha da Costa de Minde e da Costa de Mira, a nordeste pelas vertentes do Planalto de S. Mamede e a sudeste pelas vertentes da Serra de Aire (Crispim, 2000). O Polje de Minde apresenta inundações periódicas (Figura 7.1) em resultado do afluxo proveniente das nascentes temporárias situadas nos bordos norte e este e da fraca capacidade de esgotamento dos sumidouros situados no fundo e no bordo oeste.

No Planalto de S. Mamede identificam-se duas extensas superfícies de aplanção, sendo a denominada “nível das Pias” (Fernandes Martins, 1949) a superfície que define o topo dos cabeços mais elevados, entre os quais se desenvolvem depressões fechadas, nomeadamente ao longo da linha de falha de Vale de Barreiras. O exocarso apresenta, além das grandes depressões fechadas, vales cársticos, alguns suspensos por falha, pequenas dolinas e campos de lapiás. O endocarso está também representado por numerosas lapas e algares (SPE, 1974), de que se salienta o sistema subterrâneo das grutas de Moinhos Velhos, Pena e Contenda, com mais de uma dezena de quilómetros de galerias a seco e submersas (Crispim, 1987, 2000; Crispim et al., 2014).

7.2. Enquadramento hidrogeológico

Os limites do sistema aquífero Maciço Calcário Estremenho não correspondem, na íntegra, aos limites da unidade geomorfológica definida por Fernandes Martins (1949), pois a circulação subterrânea estende-se para lá desta. Os limites da cartografia geológica foram considerados na delimitação do sistema aquífero, nomeadamente a passagem dos termos essencialmente carbonatados aos argilosos do Jurássico superior (“Camadas de Montejunto” a “Camadas de Alcobaça”) abrangendo uma área de 768 km² (Almeida et al., 2000).

O aquífero principal é constituído por rochas calcárias do Jurássico médio e superior com uma espessura que varia entre 300 e 1500 m (Manuppella et al., 1985; Crispim, 1992). A base destas formações compreende os primeiros termos calcários do Aaleniano, os calcários do Bajociano, os calcários dolomíticos da passagem do Bajociano ao Batoniano, os calcários do Batoniano e do Caloviano e também os calcários, conglomerados calcários e calcários margosos do Oxfordiano (Zbyszewski & Almeida, 1960; Camarate França & Zbyszewski, 1963; Zbyszewski et al., 1971; Zbyszewski et al., 1974). O muro do aquífero principal é constituído pelas margas e calcários margosos do Toarciano e Aaleniano, por sua vez o teto pode ser constituído pelos argilitos e margas do Kimeridgiano, pelas argilas e arenitos do Titoniano ou pelos arenitos do Cretácico (Figura 7.2).

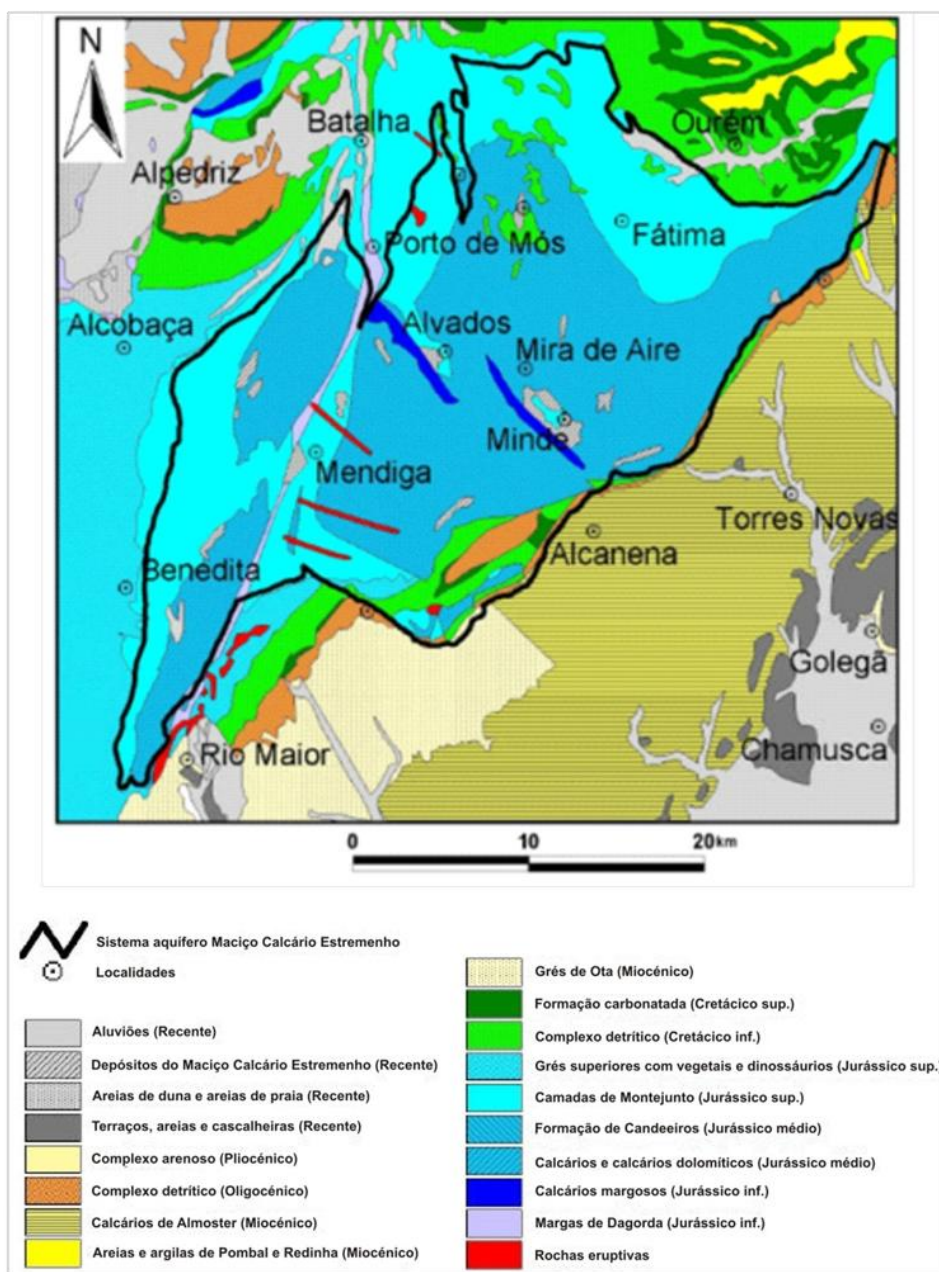


Figura 7.2 - Enquadramento litoestratigráfico do sistema aquífero do Maciço Calcário Estremenho (*in*: Almeida et al., 2000).

Este sistema é bastante complexo, apresentando um comportamento típico de aquífero cársico. Uma área tão extensa apenas drenada por cinco nascentes perenes e várias nascentes temporárias que entram em funcionamento em períodos de cheia corrobora o modelo conceptual do padrão de escoamento deste sistema aquífero ser bastante evoluído e hierarquizado (Almeida et al., 2000).

A precipitação média anual varia entre os 1000 e 1600 mm/ano. Estimam-se que os recursos renováveis apresentam valores compreendidos entre 300 e 500 hm³/ano (Crispim & Monteiro, 1990; Oliveira & Lobo-Ferreira, 1994; Almeida et al., 2000). O total escoado através das três nascentes principais, Alviela, Almonda e Lis é estimado em cerca de 275 hm³/ano (Almeida et al., 1995), correspondendo ao Lis 60 a 70 hm³/ano.

As únicas nascentes situadas no interior do maciço encontram-se no corredor deprimido que faz a separação dos Planaltos de Santo António e de S. Mamede. Na Fórnea de Alvados são conhecidas cerca de uma dezena de nascentes, no Polje de Alvados a nascente principal é a Falsa e no Polje de Minde são conhecidas as nascentes temporárias do Olho de Mira, Poio, Contenda e Regatinho. As nascentes situadas nos poljes e a nascente da Cova da Velha, na Fórnea de Alvados, estão relacionadas com importantes redes de galerias que permitem o acesso ao nível freático na época estival.

A captação do Olho de Mira, que intersecta parte da galeria sempre inundada da gruta com o mesmo nome, é o objeto de estudo do presente trabalho.

7.3. Captação do Olho de Mira

A gruta do Olho de Mira, cuja entrada se situa a 700 metros a este da falha da Costa de Minde-Mira, tem cerca de 500 m de extensão e 80 metros de profundidade (Paradela, 1971). A água que emerge por esta gruta em níveis altos forma o denominado rio do Olho, sendo a primeira nascente do Polje de Minde a entrar em funcionamento na estação chuvosa (Figura 7.3).



Figura 7.3 - Rio do Olho em funcionamento à saída da nascente do Olho de Mira (Fotografia de dezembro de 2010).

O Olho de Mira começou a ser explorado, por iniciativa privada, como origem de água para o abastecimento de algumas unidades industriais. Esta exploração ocorria de modo muito rudimentar, uma vez que consistia em bombear água da galeria natural, o que implicava frequentes deslocações do grupo de bombas para acompanhar as descidas e subidas do nível. Por volta de 1964 a gruta foi intervencionada (Figura 7.4) com o objetivo de abastecer as povoações locais projetando-se a extração de um volume diário de 5000 m³ de água.

Pouco depois do início da exploração conclui-se que o esquema adotado não resultava devido ao grande número de avarias provocadas pela subida turbulenta das águas que arrastavam consigo grandes massas de lama, areias e calhaus, como também devido ao traçado sinuoso da gruta que não ajudava no assentamento das condutas elevatórias (Paradela, 1971).



Figura 7.4 - Vestígios das intervenções efetuadas na galeria da gruta do Olho de Mira antes da construção da captação atual (Fotografias de julho 2010).

A construção de um poço que intersectasse a parte da galeria sempre inundada foi a solução escolhida para solucionar o problema na extração de água da gruta de Olho de Mira. Construiu-se então um poço com 3 metros de diâmetro e 108 metros de profundidade. Foi ainda necessário escavar uma galeria inclinada que permite a entrada de água no poço ficando esta com a soleira à cota 102 m (Paradela, 1971).

A captação Olho de Mira localiza-se no concelho de Porto de Mós (distrito de Leiria), na vila de Mira de Aire, sede da freguesia com o mesmo nome (Figura 7.5). Figura na Folha 318 (Mira de Aire) da Carta Militar de Portugal, na escala 1/25 000, e o topo do poço apresenta-se à cota 205 m. Esta captação abastece atualmente as freguesias de Mira de Aire e parte da união de freguesias de Alcaria e Alvados, cerca de 4000 habitantes segundo os Censos de 2011 (INE, 2013). O abastecimento é interrompido na ocorrência de eventos pluviosos que perturbem a qualidade da água, nomeadamente no que diz respeito à quantidade de partículas em suspensão.

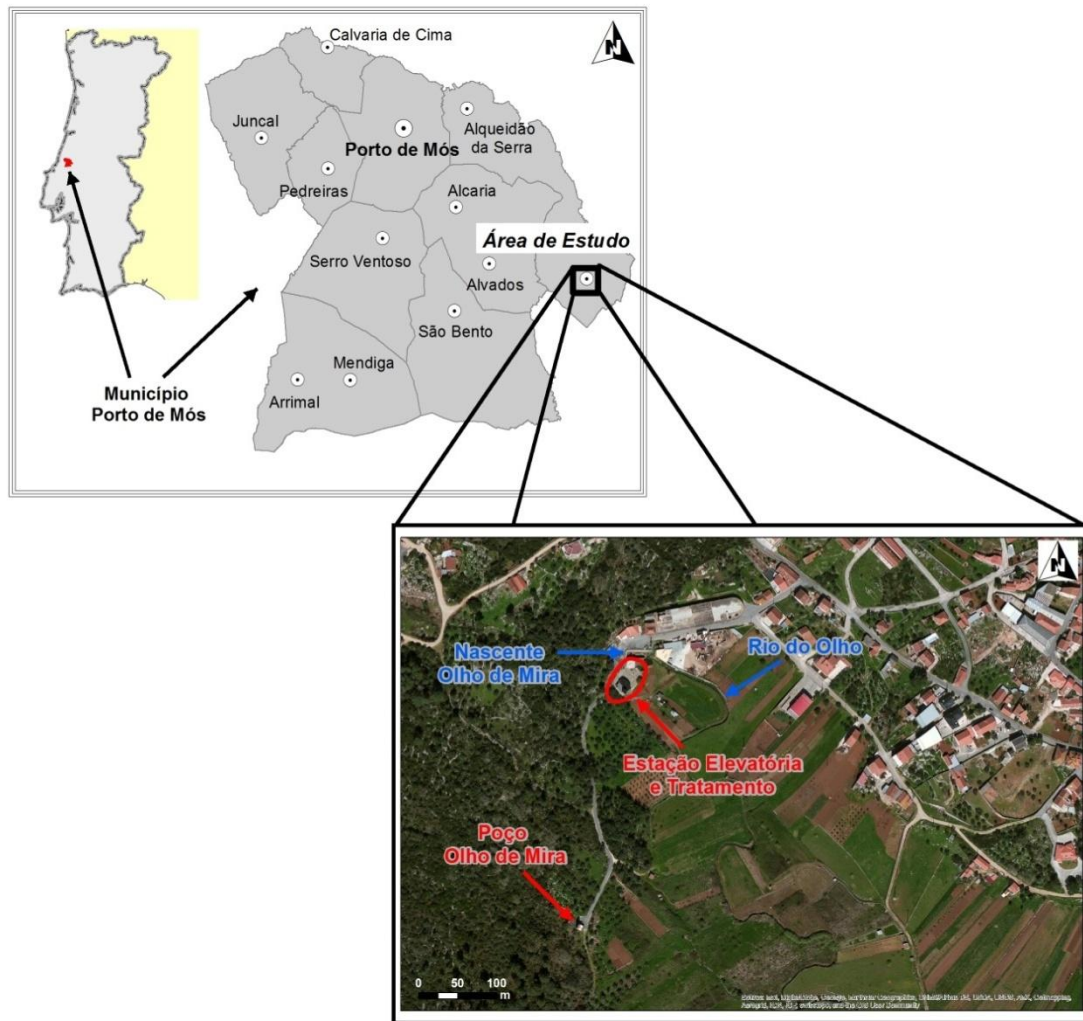


Figura 7.5 - Enquadramento geográfico da Captação do Olho de Mira e estação elevatória, no Município de Porto de Mós (imagem de satélite extraída de ArcGis 10 - ArcGisOnline, dezembro, 2010).

7.3.1. Bacia de alimentação do poço e nascente do Olho de Mira

A delimitação das áreas de alimentação das nascentes cársicas apresenta grandes dificuldades devido ao seu padrão altamente complexo de escoamento. A forma mais segura de fazer essa delimitação é através de testes de traçagem. No entanto, tais operações são muitas vezes difíceis de executar, por falta de condições hidrológicas ou de locais de injeção, e de custo elevado, de modo que o seu número é quase sempre limitado. Quando não se dispõe de dados de traçagens nem de observação direta obtida em estudos espeleológicos, a delimitação das bacias é feita com base em critérios litológicos, estruturais, geomorfológicos, entre outras, que implicam sempre um grau mais ou menos elevado de incerteza. Crispim (2010) apresenta a delimitação das bacias e sub-bacias de escoamento nascentes perenes e temporárias do Maciço Calcário Estremenho (Figura 7.6). Tal como o próprio autor indica, esta delimitação é muito grosseira pelo facto das experiências de traçagens não serem suficientes para uma delimitação mais fina.

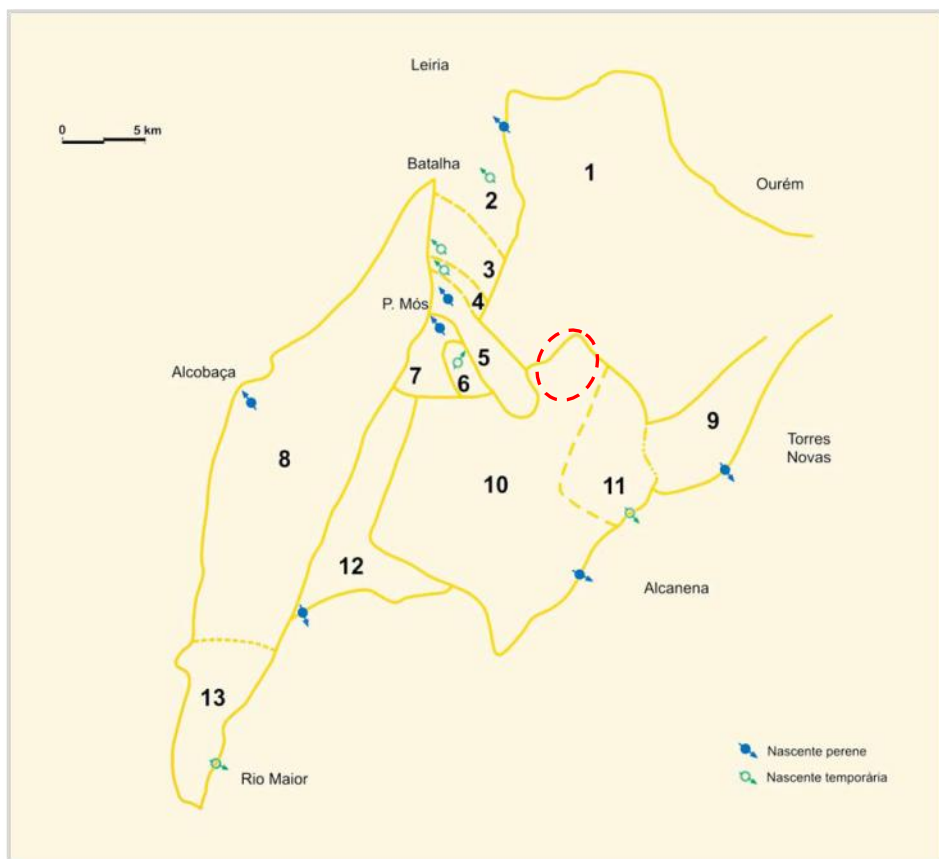


Figura 7.6 - Bacias e sub-bacias no Sistema Aquífero do Maciço Calcário Estremenho: 1 - Lis; 2 - Reixida; 3 - Fonte dos Marcos; 4 - Rio Seco; 5 - Alcaide; 6 - Fórnea; 7 - Lena; 8 - Chiqueda; 9 - Almonda; 10 - Alviela; 11 - Vila Moreira; 12 - Alcobertas; 13 - Bocas do Rio Maior (*in* Crispim, 2010). Tracejado vermelho indica localização da bacia do Olho de Mira.

A bacia de alimentação da nascente Olho de Mira faz parte integrante da bacia de alimentação da nascente dos Olhos de Água do Alviela, com número 10 na Figura 7.6. Os limites desta mesma bacia foram publicados a 17 de Novembro de 2010 na Portaria n.º 1187/2010, alterada pela Portaria n.º 97/2011, de 9 de Março como área de proteção intermédia e alargada, pelo facto de nesta nascente estar implantada o polo de captação da empresa EPAL, atualmente desativado.

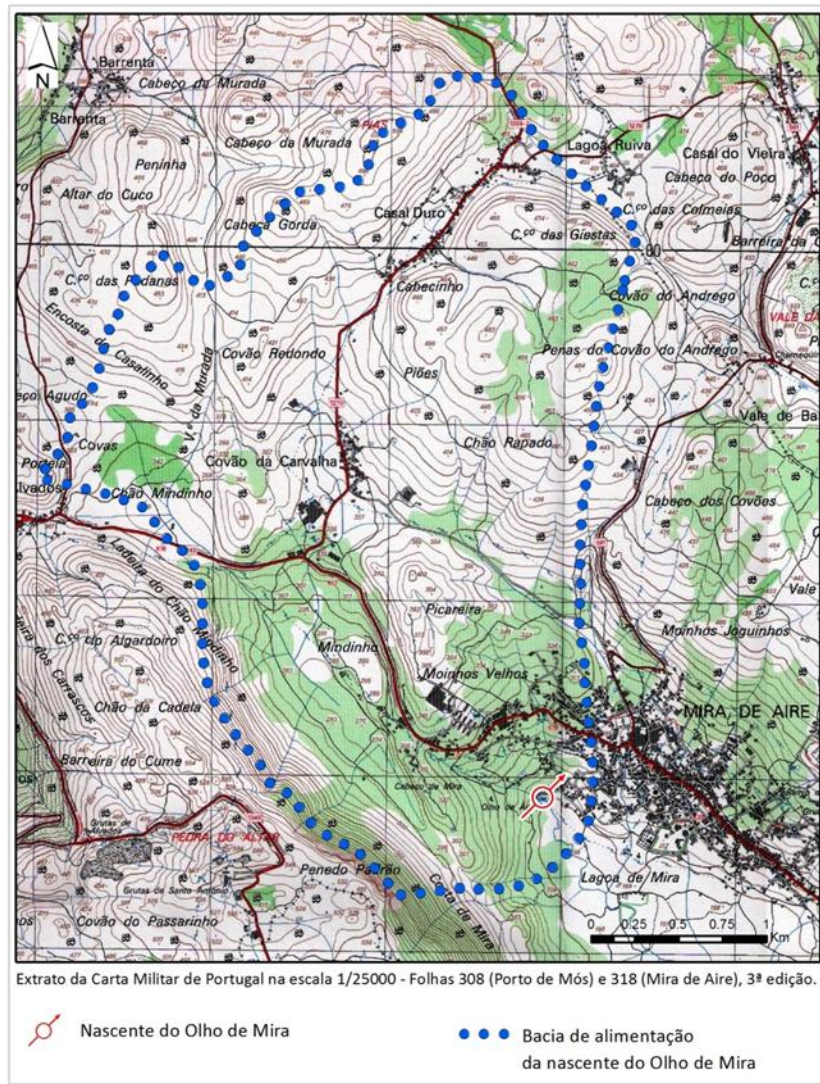


Figura 7.7 - Delimitação da bacia hidrogeológica da nascente do Olho de Mira, implantada sobre a Carta Militar de Portugal, Folhas 308 – Porto de Mós e 318 – Mira de Aire.

A proposta de delimitação da bacia de alimentação do Olho de Mira é observada na Figura 7.7 e Figura 7.8 sobre a carta militar e carta geológica, respetivamente. Esta delimitação seguiu os acidentes tectónicos a nordeste (parte da falha de Vale de Barreiras) e parte da vertente sudoeste (falha da costa de Mira) até intersectar os termos do Aaleniano (visíveis na cartografia de Zbyszewski et al., 1974) que se acredita estarem carsificados, tal como foi demonstrado por testes de traçagens na zona sul do Polje de Minde (Crispim, 1986, 1995, 2007). Os critérios geomorfológicos e/ou topográficos foram aplicados nos restantes limites da bacia (a noroeste e a su-sudeste).

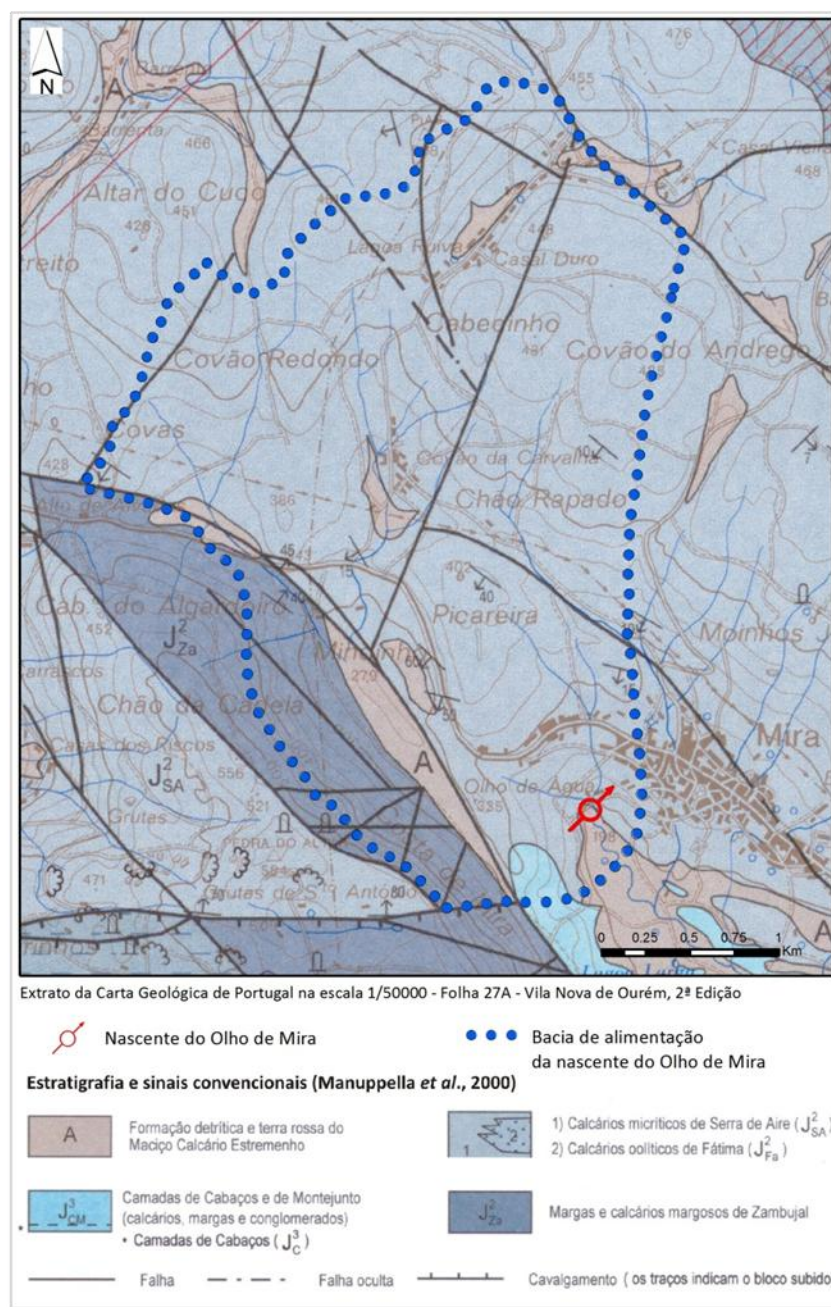


Figura 7.8 - Delimitação da bacia hidrogeológica da nascente do Olho de Mira, implantada sobre a Carta Geológica de Portugal, Folha 27A - Vila Nova de Ourém (Manuppella et al., 2000).

A zona norte do Polje de Minde e as vertentes estruturais a nordeste concorrem para a alimentação do Olho de Mira, como parece poder deduzir-se da organização geralmente centrípeta das galerias subterrâneas em torno da depressão de Minde (Crispim, 1987, 1995). A operação de traçagem efetuada em Moinhos Velhos e a não deteção do corante no Olho de Mira (Crispim, 1995 - ver 5.5.1) justifica o limite geomorfológico a sudeste.

7.3.2. Explorações espeleológicas, operações de traçagens e quimiograma do Olho de Mira

Explorações espeleológicas levadas a cabo pela Sociedade Portuguesa de Espeleologia nos anos 70 e 80 na cavidade do Mindinho, situada na depressão com o mesmo nome a norte de Mira de Aire, anteviam uma possível ligação com a gruta do Olho de Mira (Crispim, 1995). Trabalhos mais recentes demonstraram a ligação hidrológica entre sumidouros da depressão do Mindinho e a nascente do Olho de Mira (Lopes et al. 2007). Na Figura 7.9 observa-se um corte esquemático da representação das duas grutas.

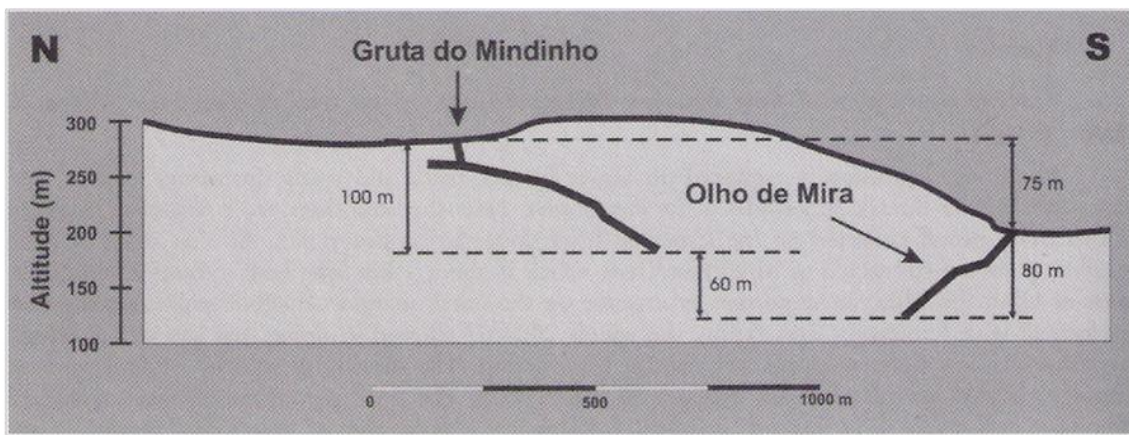


Figura 7.9 - Corte esquemático entre a depressão do Mindinho e o Polje de Minde com a representação das grutas do Mindinho e do Olho de Mira (in: Lopes et al., 2007).

Os ensaios de traçagem efetuados no Polje de Minde (ver Capítulo 5) indicaram que tanto a nascente de Vila Moreira como os Olhos de Água do Alviela e do Almonda recebem uma contribuição proveniente do Polje de Minde (Crispim, 1986, 1995, 2007). Isto significa que o Polje de Minde coincide com uma zona de divergência de fluxo, nas direções NE e SE. É possível que o padrão de drenagem mude em função dos níveis piezométricos, isto é, ao longo do ano hidrológico.

As águas das enxurradas que escorrem pelos barrancos da Costa de Mira, no sector das Ventas do Diabo, perdem-se em sumidouros junto à falha e alimentam os coletores subterrâneos da Gruta do Mindinho (Crispim, 2000). A operação de traçagem efetuada nestes sumidouros (Lopes et al., 2007) concluiu que circula em profundidade uma quantidade de água cerca de 10 a 15 vezes superior à que saí no Olho de Mira, com velocidade reduzida e por galerias com grande diâmetro, eventualmente atravessando a falha da Costa de Minde-Costa de Mira.

Na sua tese, Crispim (1995) apresentou o quimiograma da nascente do Olho de Mira, durante o pico de cheia de 24 a 30 de novembro de 1991. Identificou, razoavelmente, a proveniência da água que emergia na nascente (Figura 7.10), embora a importância desse pico não fosse a esperada pelo autor.

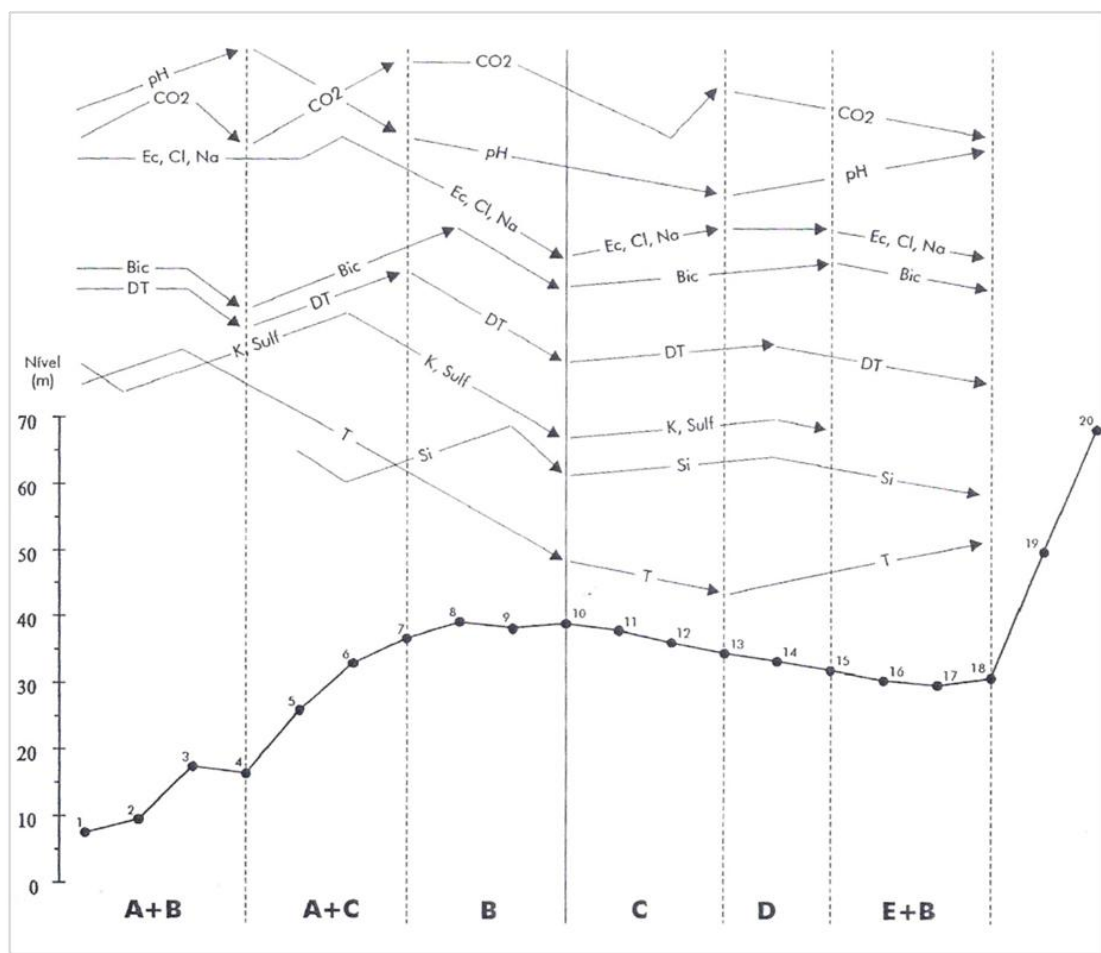


Figura 7.10 - Síntese da variação química das águas no Olho de Mira, durante o pico de cheia de 26 a 30 de novembro de 1991. A: Galerias da z. saturada (efeito de pistão) + zona vadosa; B: Zona vadosa; C: Epicarso + Água superficial; D: Zona saturada + Água superficial; E: Zona saturada predominante. (in: Crispim, 1995).

Na Figura 7.10 observa-se, com uma periodicidade de 8 horas, a variação dos parâmetros da temperatura, pH, CO_2 , condutividade, os parâmetros próprios do sistema cársico (bicarbonatos, alcalinidade total, dureza total, cálcio e magnésio) e os parâmetros exteriores ao sistema cársico (cloretos, sódio, potássio, sulfatos e sílica). A variação das características da água durante o crescimento é muito irregular (pontos 1 a 7) e a sobreposição de águas com características diferentes é relativamente precoce comprovado pelos pontos 15 a 18 (Crispim, 1995).

7.3.3. Análise da qualidade da água da captação do Olho de Mira

A qualidade da água proveniente de aquíferos cársicos, normalmente, é boa para consumo humano, atestada pelas inúmeras cidades ao longo do globo que se instalaram perto de nascentes cársicas, pelo que a sua proteção constitui um objetivo fulcral. O que é facto é que dada a elevada vulnerabilidade dos aquíferos cársicos, a sua proteção muitas vezes torna-se tarefa complexa. Alguns aspetos a ter em consideração no comportamento dos aquíferos cársicos relativamente à contaminação são:

- A sua fraca capacidade em filtrar, absorver e adsorver o contaminante, resultando num rápido transporte do contaminante e ineficácia em diminuir as suas concentrações;
- Como consequência das altas velocidades de escoamento da água subterrânea e, por consequência, tempo de residência curto, alguns processos de decaimento são pouco efetivos e os contaminantes atingem rapidamente as nascentes e captações;
- Em contrapartida as condições oxidantes que são comuns nas águas dos aquíferos cársicos contrariam a presença de elevadas concentrações de alguns contaminantes como por exemplo amónia, Fe, Mn e alguns outros metais pesados.

A poluição dos aquíferos cársicos pode ser sazonal (por exemplo, descargas de lagares de azeite, como é o caso nas nossas regiões), accidental (derrames, descargas de efluentes), ou permanente, como resultado da presença de estradas e autoestradas, aterros e lixeiras, depósitos de materiais contaminantes, agricultura e aglomerados urbanos sem rede de saneamento ou com saneamento deficiente.

A captação do Olho de Mira pertence à rede de qualidade do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH – www.snirh.pt), com referência 318/C83. Entre o período de 19-Abril-2005 e 03-Mar-2014 foram colhidas 18 amostras de água e analisados ao todo 97 parâmetros. De acordo com o Decreto-Lei 306/2007 de 27 de agosto, apenas foi detetado o parâmetro de ferro com 230 mg/l, quando o valor paramétrico é de 200 mg/l, na colheita de 10-Dez-2012. A nível bacteriológico nas 18 colheitas de amostras de água ocorreram sempre parâmetros acima do máximo admissível por aquele Decreto-Lei (ANEXO 3).

A presença de Coliformes fecais e intestinais, Enterococos e *E.Coli* normalmente estão associadas à contaminação de origem fecal geralmente proveniente de uma rede de saneamento e/ou fossas sépticas pouco eficiente ou mesmo inexistente, fertilização dos terrenos com excrementos humanos ou de animais, entre outras possibilidades.

Pelo menos Crispim & Monteiro (1990) e Almeida et al., (1995) haviam referido este tipo de contaminação na nascente do Olho de Mira, como em outras do Maciço Calcário Estremenho.

7.4. Limnigrama do poço da captação do Olho de Mira

No ano hidrológico de 1991/1992 foram recolhidos dados em contínuo da variação do nível de água no poço da captação do Olho de Mira por José António Crispim para tratamento oportuno. Na altura foram registados dados em 24 folhas de limnógrafo de tambor, compreendidos entre os períodos de 31 de outubro de 1991 e 14 de novembro de 1992. Alguns problemas técnicos (encrave do tambor)

no registo das primeiras quatro folhas inviabilizaram a sua utilização, pelo que a primeira folha de registo interpretada é a n.º 5 a começar no dia 06 de dezembro de 1991, às 18h31 com o nível 29,01 m abaixo da referência. A última folha de registo interpretada corresponde à n.º 21 com dados a terminar no dia 04 de outubro de 1992, às 16h52 com o nível 84,90 m abaixo da referência.

De seguida é exposta a metodologia utilizada na extração dos valores numéricos a partir das curvas gravadas nas folhas do limnigrama e posterior conversão em valores discretos.

7.4.1. Aquisição e tratamento dos dados

Os dados foram registados em contínuo com o auxílio de um limnígrafo de flutuador e tambor. Este aparelho permite a medição dos níveis no poço com recurso a uma boia que permanece à superfície da água e que se encontra ligada por um cabo de invar a um sistema de registo em tambor. Na folha de registo é traçada a curva do limnigrama, linha composta pelos sucessivos valores dos níveis de água durante determinado intervalo de tempo. A título de exemplo, na Figura 7.11 apresenta-se uma das folhas de registo do poço da captação do Olho de Mira (Gráfico 8). De modo a facilitar a interpretação das linhas sobrepostas, optou-se por colori-las. No exemplo apresentado observa-se que o registo começa com a linha de cor verde, no lado esquerdo da folha, onde está registado o dia, hora e nível de água aquando o início do registo. Quando o tambor dá uma volta completa sobre o seu eixo, mudámos a cor da linha para laranja, e posteriormente para azul, onde termina, observando-se que naquele momento o nível estava a recuperar, voltando-se a registar o dia, hora e nível de água.

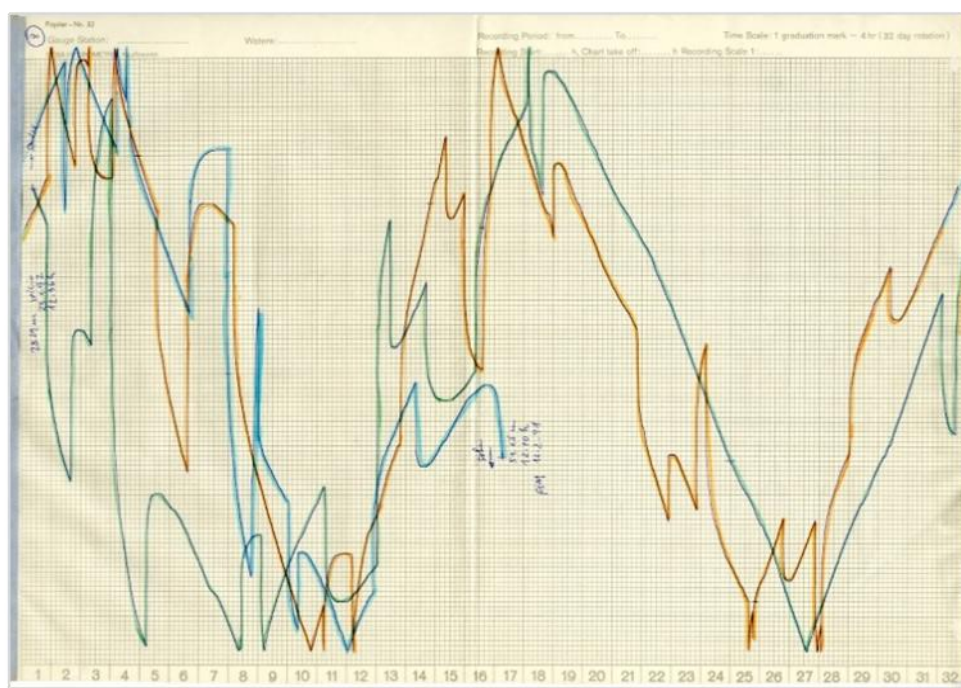


Figura 7.11 - Folha de registo do poço da captação do Olho de Mira entre o período 23-01-1992 a 12-02-1992.

A folha de registo, em papel milimétrico, de dimensão A₃ foi digitalizada e o respetivo limnigrama “picado” num *software* de desenho e tratadas as suas particularidades:

- A inversão das linhas pelo facto de a caneta de registo intersectar o topo ou base da folha;
- A sobreposição das linhas resultantes de um período de registo superior a 8 dias, uma vez que o tambor demora 189,6 horas a dar uma volta completa sobre o seu eixo.

Na Figura 7.12 observa-se o limnigrama resultante da folha de registo da Figura 7.11. No eixo horizontal, 1 mm corresponde a 0,5 hora e no eixo vertical corresponde a 1 cm. O mês de fevereiro de 1992 teve 29 dias e o horário foi atrasado em 60 minutos no dia 29 março de 1992.

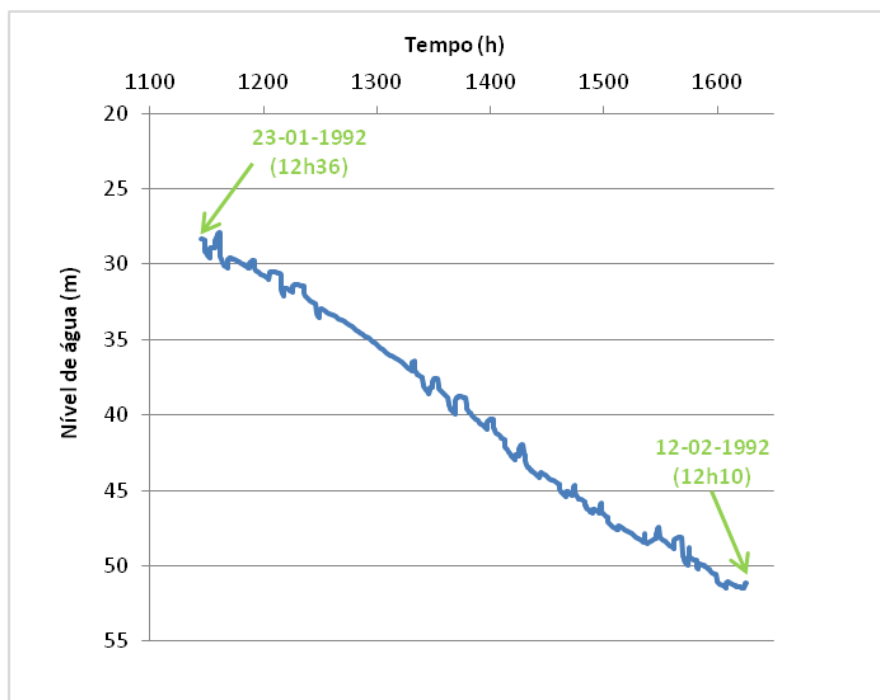


Figura 7.12 - Limnigrama resultante da folha de registo da Figura 7.11.

Posteriormente o limnigrama foi transformado em valores discretos, com o tempo, em horas, no eixo das ordenadas e no eixo das abcissas o nível de água no poço em metros, com referência 0 na boca do poço. No total foram tratadas 17 folhas de registo, perfazendo 7269 horas (303 dias) com dados em contínuo. Apenas houve um hiato de 529 horas (22 dias) no registo entre o período 4874 e 5403 horas devido a problemas técnicos (entre os dias 26 de junho e 18 de julho de 1992).

A variação do nível de água no poço da captação do Olho de Mira ao longo de 303 dias de registo em contínuo é observável na Figura 7.13, onde está marcado a vermelho o hiato mencionado anteriormente.

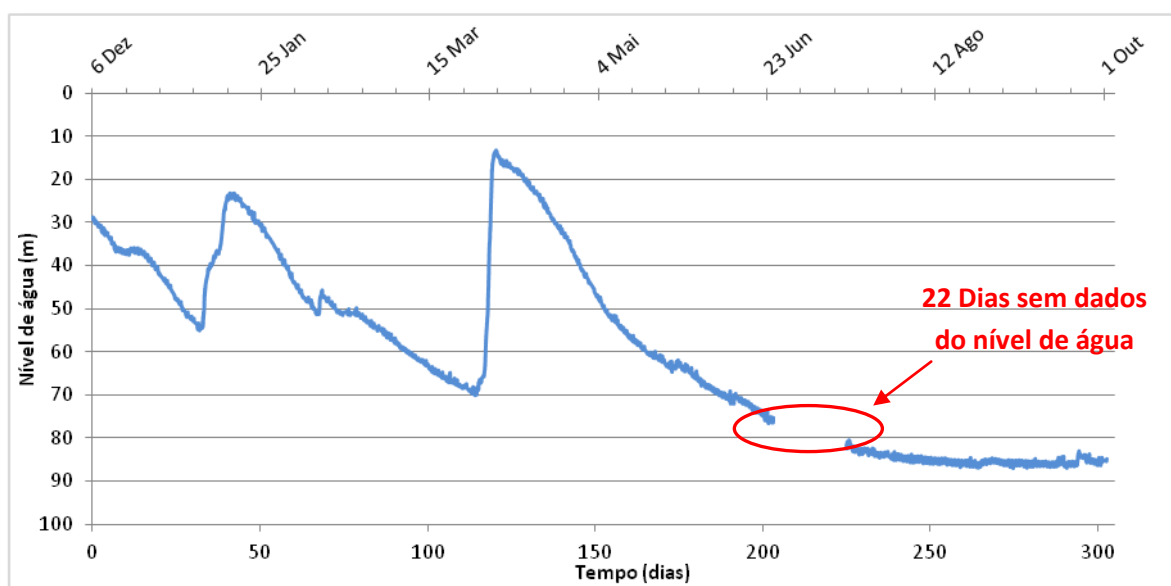


Figura 7.13 - Evolução do nível de água no poço da captação do Olho de Mira ao longo de 303 dias (6 dezembro de 1991 a 4 de outubro de 1992).

7.4.2. Influência da precipitação no nível de água do poço da captação Olho de Mira

Na plataforma *online* do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH – www.snirh.pt) foram coletados os dados das precipitações diárias ocorridas nas estações udométricas de Crespos (16E/01UG), Minde (16E/03UG) e Serra de Santo António (16E/04U), por serem as mais próximas da bacia de alimentação da nascente do Olho de Mira delimitada em 7.3.1 (Figura 7.14).

Visualmente foi averiguada qual das estações udométricas representaria melhor a relação entre os eventos pluviosos e variação do nível no poço. O facto de a periodicidade dos dados ser diária revelou-se inadequada para tal análise. Optou-se então por fazer uma média dos valores diários medidos em cada uma das três estações udométricas e utilizá-los na análise da influência da precipitação na variação do nível de água. Os dados das precipitações diárias de cada estação e a sua média encontram-se no Anexo 4.

A comparação da variação do nível no poço da captação do Olho de Mira com a variação da média da precipitação nas três estações udométricas referidas pode ser avaliada na Figura 7.15. Os eventos de pluviosidade que ocorreram depois dos 150 dias de registo (meses estivais), parecem não ter expressão na variação do nível de água do poço, sendo apenas visíveis algumas perturbações na sua tendência de decrescimento ou mesmo recuperações na ordem dos 2 a 3 metros. As influências da precipitação são bastante mais notórias à esquerda do último pico de cheia registado, meses coincidentes com o período pluvioso (dezembro a abril). Optou-se assim por analisar os primeiros

100 dias do registo do hidrograma e as precipitações que deram origem ao pico de cheia de 5 de abril 1992.

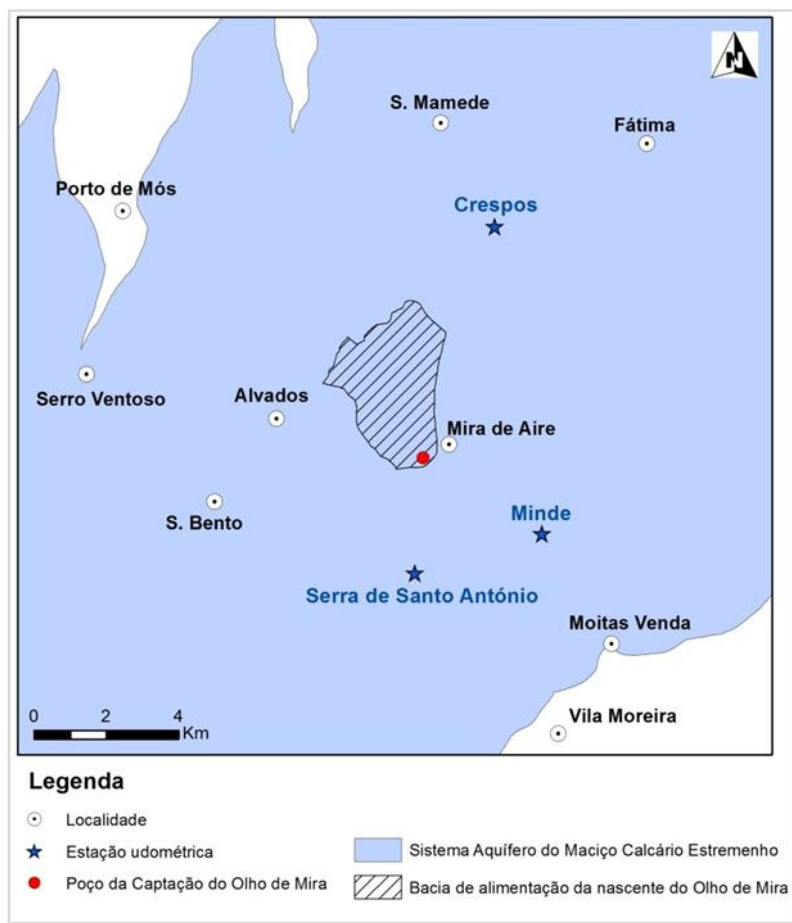


Figura 7.14 - Localização das estações udométricas mais próximas da bacia de alimentação da nascente do Olho de Mira.

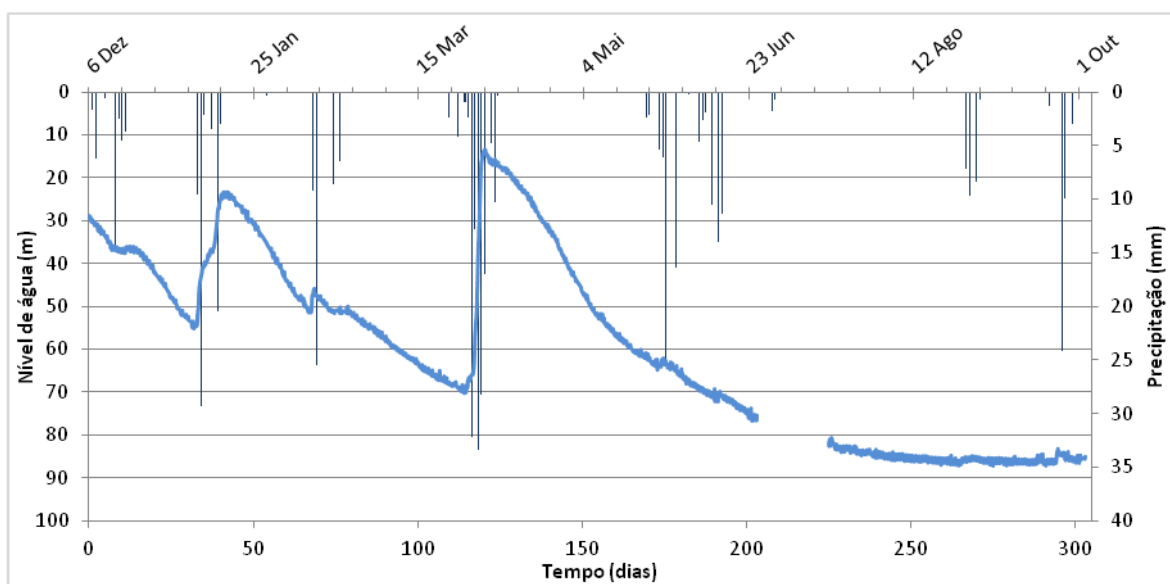


Figura 7.15 - Limnigrama do poço da captação do Olho de Mira e média das precipitações das estações udométricas de Crespos, Minde e Serra de Santo António, entre 06 dezembro de 1991 e 4 outubro de 1992.

Análise dos primeiros 100 dias de registo

Na Figura 7.16 encontram-se os 100 primeiros dias de registo (06 de dezembro 1991 a 15 de março 1992) onde é possível individualizar, grosseiramente, três eventos de recarga: nos primeiros dez dias, entre os 30 e 40 dias e entre os 68 e 76 dias de registo.

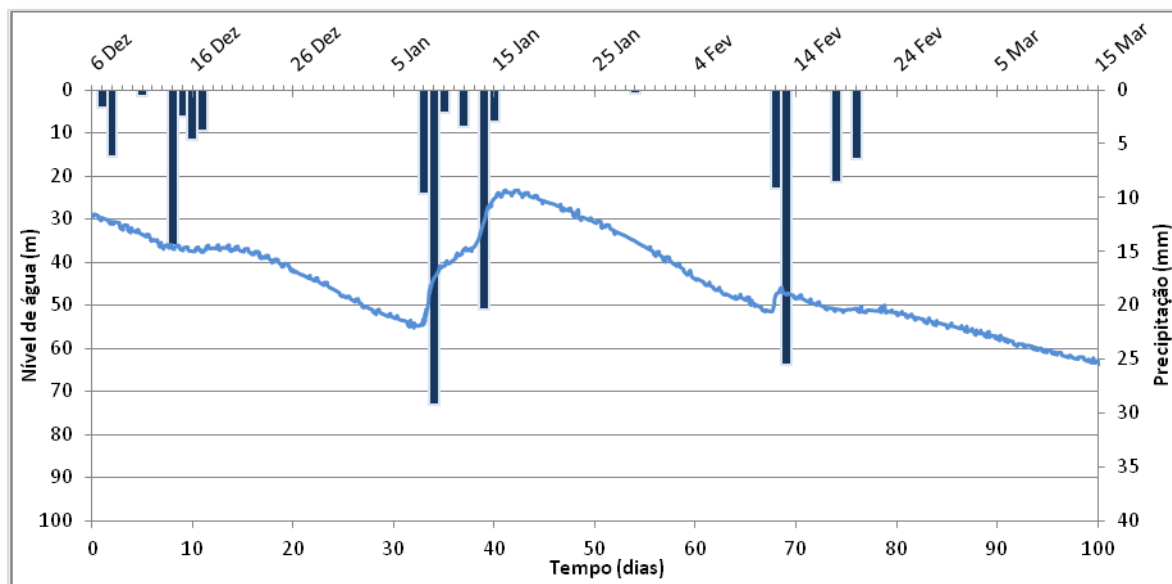


Figura 7.16 - Pormenor da influência da precipitação no hidrograma do poço Olho de Mira nos primeiros 100 dias de registo.

Nos primeiros dias de registo observa-se que a tendência do nível de água no poço é para descer, mesmo com a presença de precipitação nos dois primeiros dias. Esta tendência foi interrompida, sem recuperação, com um dia de precipitação de 15 mm. Possivelmente devido às precipitações dos dias seguintes, a cota da água manteve-se estável até ao dia 17 voltando à sua tendência inicial.

No início de janeiro (33º dia) ocorre um novo evento de pluviosidade que interrompe a pendente decrescente do nível de água. Este recupera 10 metros num dia devido ao efeito de 29 mm de precipitação no dia 34. Nos 4 dias seguintes a tendência foi de recuperação (6 metros com precipitações inferiores a 5 mm em dois desses dias). O nível de água tem novo incremento originado pela precipitação de 20 mm resultando numa subida de 6 metros.

No dia 68, a precipitação de 9 mm foi apenas para quebrar a tendência decrescente do nível aquífero, tal como nos dias 74 e 76 com 9 e 7 mm, respetivamente. A precipitação do dia 69 (26 mm) resultou na recuperação do nível em 5 metros.

Análise do pico de cheia

Na Figura 7.17 observam-se as precipitações que deram origem ao maior e último pico de cheia do hidrograma do poço Olho de Mira registado.

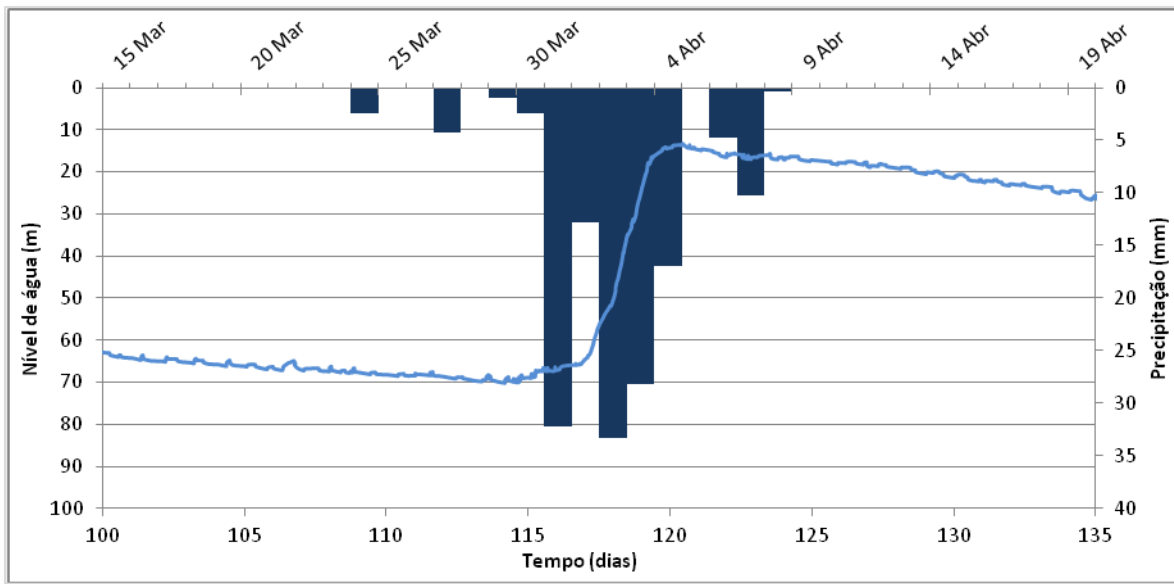


Figura 7.17 - Influência das precipitações ocorridas entre março e abril de 1992 no nível de água do poço da captação do Olho de Mira provocando o maior pico de cheia registado.

O nível de água no poço encontrava-se 70 metros abaixo da boca do poço e as precipitações inferiores a 5mm nos dias 109, 112, 114 e 115 foram insuficientes para interromper a sua tendência decrescente. Apenas no dia 116 e 117, com uma precipitação de 32 mm e 13 mm, verificou-se 13 metros de recuperação. As precipitações dos dias 118, 119 e 120 com precipitações de 33, 28 e 17 mm refletiram-se numa subida rápida, num total de 40 metros, sendo no dia 118 a maior recuperação com 21 metros. As precipitações dos dias 122 e 123 reverteram um pouco a tendência regressiva do nível de água, perturbando assim o início da curva de recessão analisada mais à frente neste trabalho.

Discussão dos resultados

A baixa resolução dos dados de precipitação não permitiu perceber qual das estações udométricas tem mais semelhanças com a evolução do nível de água no poço, pelo que se optou por utilizar a média da precipitação das três estações. O tempo que decorre entre o evento pluvioso e a variação do nível de água no poço é sempre inferior a 24 horas.

Dos eventos analisados é possível coligir algumas conclusões: independentemente da posição do nível de água no poço e da época do ano (estação húmida ou seca), um evento de pluviosidade com precipitações inferiores a 15 mm consegue atenuar ou interromper a tendência do nível vigente antes da recarga, mas é insuficiente para provocar a sua recuperação. A precipitação mínima observada com recuperação do nível, sem já existir essa tendência de dias anteriores, foi de 26 mm no dia de registo 69, com uma recuperação de 5 metros. Observando-se assim que o aquífero apresenta uma considerável capacidade de regularização.

Em 3 dias de precipitações a rondar os 30 mm/dia provocou a recuperação do nível de água no poço em 40 metros. Este exemplo poderá ser indicação de que a bacia de alimentação da nascente do Olho de Mira tem importantes pontos de recarga concentrada (como por exemplo os sumidouros da depressão do Mindinho), justificando esta rápida resposta, com o pressuposto que essas precipitações tenham sido suficientes para gerar regatos que desaguem em sumidouros. Esta observação é apoiada pelo quimiograma de Crispim (1995) em que *“a subida do nível de água no poço inicia-se com uma tendência bastante irregular na variação dos teores dos vários elementos. Isto pode ser devido (...) à existência de afluentes com componente superficial importante descarregando perto do coletor, como pode ser o caso da Gruta do Mindinho (...)”*.

O acompanhamento de mais anos hidrológicos com medições do nível de água no poço, medições de precipitação com maior periodicidade, aferição do tipo de infiltração/ recarga no sistema e a realização de análises químicas são essenciais para a compreensão deste sistema.

7.4.3. Interpretação dos ensaios de bombeamento

Aquando a recolha dos presentes dados, o poço de captação do Olho de Mira, tal como atualmente, estava equipado com um conjunto de bombas que extraía água para abastecimento de parte do concelho de Porto de Mós. Pelo que é possível individualizar dois comportamentos na evolução do nível de água no poço: um a grande escala, que corresponde à evolução natural do aquífero e outro, a uma escala de maior pormenor, que reflete os efeitos dos sucessivos bombeamentos. Aproveitando estes ensaios de bombeamento fez-se uma tentativa para estimar a transmissividade do sistema naquele local.

No ano de 1991 e 1992 estavam instaladas duas bombas no poço do Olho de Mira: uma que extraía 130 m³/hora e uma outra que extraía 70 m³/hora. A análise do limnigrama permite deduzir qual das bombas está em funcionamento, tal como se pode observar na Figura 7.18.

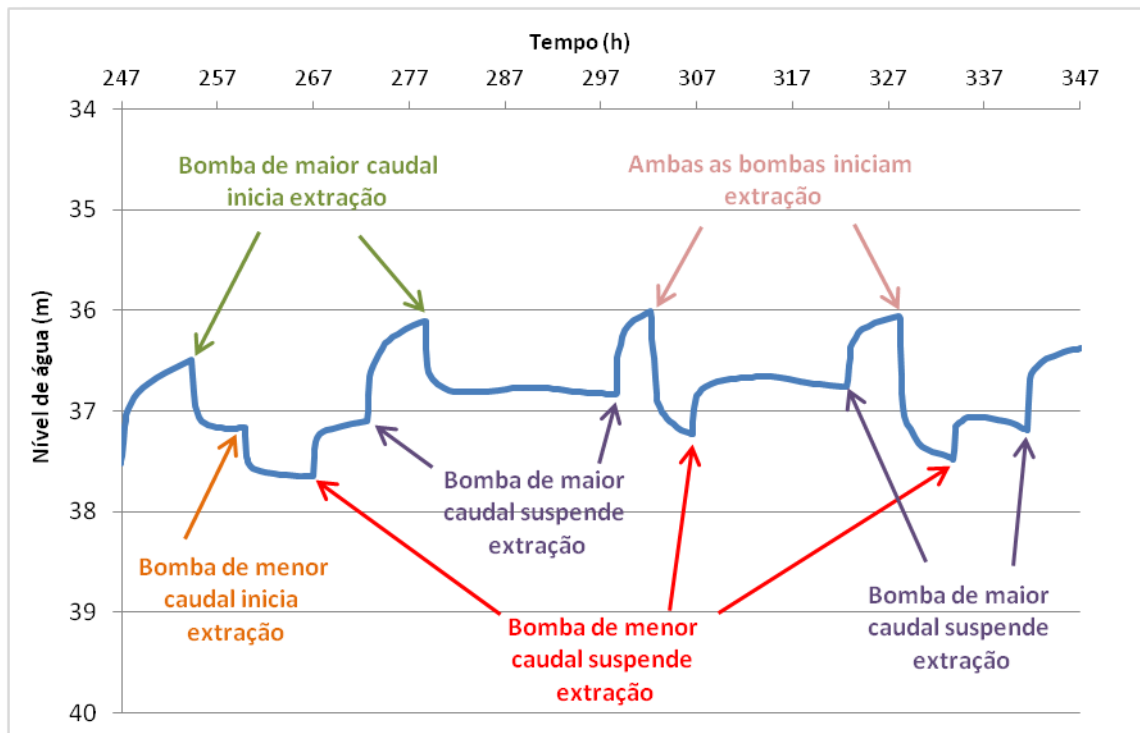


Figura 7.18 - Variação do nível de água no poço da captação do Olho de Mira consoante o caudal em extração.

Para a interpretação do ensaio de bombeamento foram escolhidos 8 ciclos de rebaixamento na parte mais horizontal da curva de recessão, onde o esgotamento natural do aquífero é menos pronunciado evitando perturbações adicionais na leitura dos dados. Os valores escolhidos foram interpretados utilizando as equações de Theis (1935), Copper & Jacob (1946) e Papadopoulos & Copper (1967). Atualmente o processamento das equações dos diferentes autores, para a interpretação dos dados recolhidos durante o ensaio de bombagem, é feita com recursos a *softwares* criados para o efeito. Neste trabalho os ensaios de bombeamento foram interpretados com o auxílio do *software* AQTESOLV (2007).

Análise dos dados de rebaixamento

Como já foi referido, os valores utilizados para interpretar os ensaios de bombeamento localizam-se na curva de esgotamento do hidrograma (durante o mês de agosto). O tempo de duração do bombeamento está dependente das necessidades hídricas da Câmara Municipal de Porto de Mós, entidade que explora a captação. O ensaio de bombagem mais longo individualizado tem 17 horas (1031 min) de duração. Os restantes sete ensaios de bombeamento têm, aproximadamente, entre 5 e 7,5 horas (295 minutos e 442 minutos) de duração. Considerou-se que todos os ensaios foram realizados com um caudal de 130 m³/h. Os valores de rebaixamento escolhidos estão livres da influência da precipitação.

Na Tabela 7.1 observa-se os valores de transmissividade obtidos utilizando as equações de Theis (1935), Cooper & Jacob (1946) e Papadopulos & Cooper (1967) para os sete ensaios de bombeamento de menor duração. A curva e/ou reta teórica foi sempre ajustada ao último conjunto de dados, na tentativa de obter o valor de transmissividade que representasse todo o sistema e que estivesse livre, dentro do possível, do efeito de armazenamento do poço, como se pode observar nos gráficos da Figura 7.19.

Tabela 7.1 – Valores de transmissividade obtidos para os bombeamentos de menor duração, utilizando diferentes equações.

Data do ensaio de bombeamento	Duração do bombeamento (min)	Transmissividade (m^2/dia)		
		Papadopulos & Cooper (1967)	Cooper & Jacob (1946)	Theis (1935)
11Ago1992	442	702	761	897
14Ago1992	336	785	624	921
16Ago1992	301	772	636	781
19Ago1992	388	745	759	806
20Ago1992	412	891	665	796
22Ago1992	295	745	768	972
24Ago1992	385	669	577	659
Min.	295	669	577	659
Máx.	442	891	768	972
Média	366	758	684	833

Na Tabela 7.2 observa-se os valores de transmissividade obtidos utilizando as equações de Theis (1935), Cooper & Jacob (1946) e Papadopulos & Cooper (1967) no ensaio de bombeamento de maior duração. Na Figura 7.20 encontram-se as curvas teóricas para as equações de Papadopulos & Cooper (1967) e Theis (1935). Por sua vez, na Figura 7.21 onde está a equação de Cooper & Jacob (1946) é possível individualizar dois conjuntos de dados e por consequência traçar duas retas teóricas.

No Anexo 5 são apresentados os dados utilizados para interpretação dos ensaios de bombeamentos, apresentados nas Tabela 7.1 e Tabela 7.2.

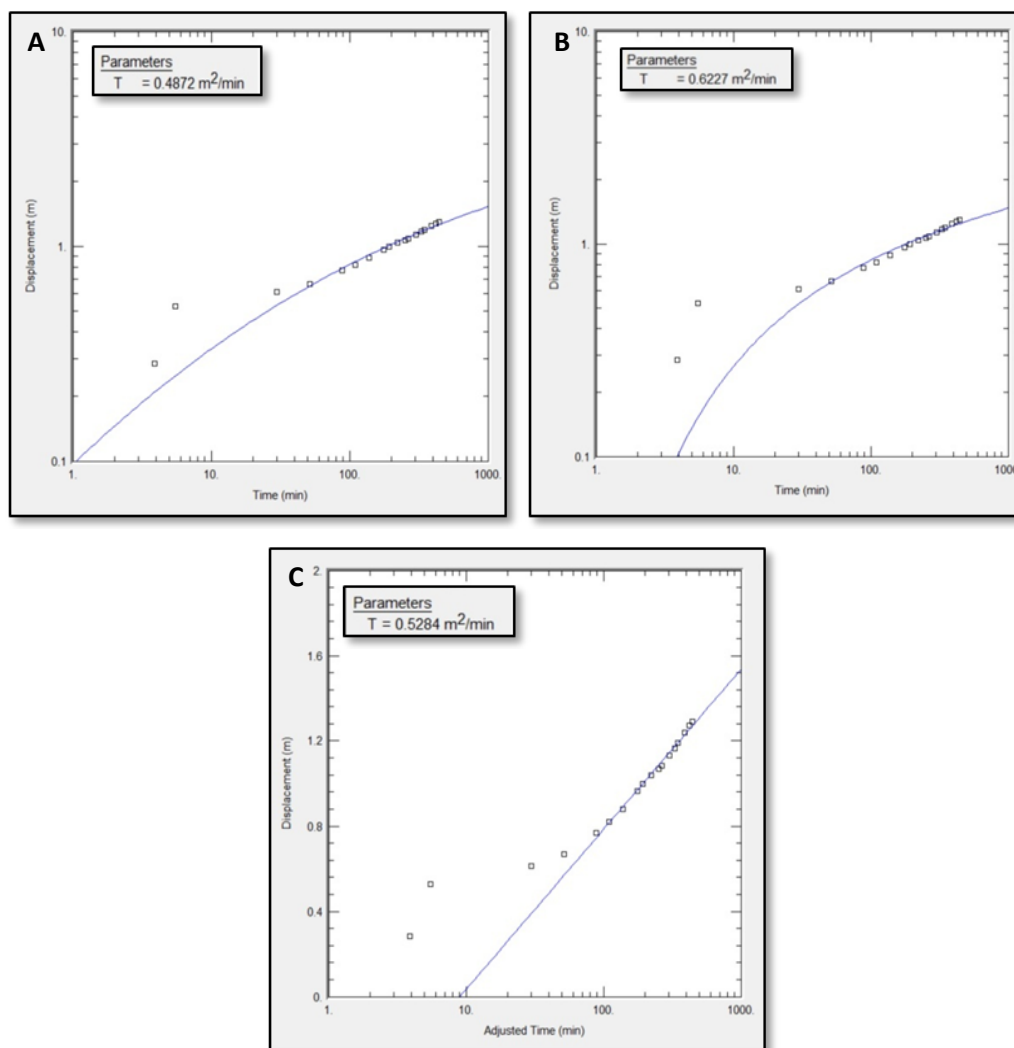


Figura 7.19 - Interpretação do ensaio de 10Ago1992, onde T é a transmissividade em m²/min: A – Aplicação da equação de Papadopulos & Cooper (1967); B - Aplicação da equação de Theis (1935); C – Aplicação da equação de Cooper & Jacob (1946).

Tabela 7.2 - Valores de transmissividade obtidos para os bombeamentos de maior duração, utilizando diferentes equações.

	Duração do bombeamento (min)	Transmissividade (m ² /dia)		
		Papadopulos & Copper (1967)	Copper & Jacob (1946)	Theis (1935)
06Ago2015	1031	827	964 ou 500	815

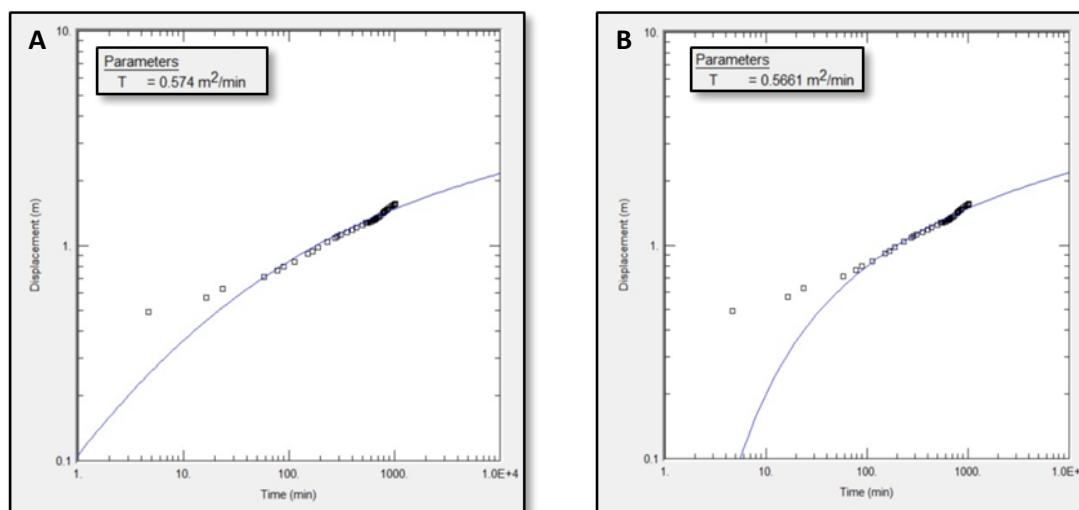


Figura 7.20 - Interpretação do ensaio de 05Ago1992, onde T é a transmissividade em m^2/min : A – Aplicação da equação de Papadopoulos & Cooper (1967); B - Aplicação da equação de Theis (1935).

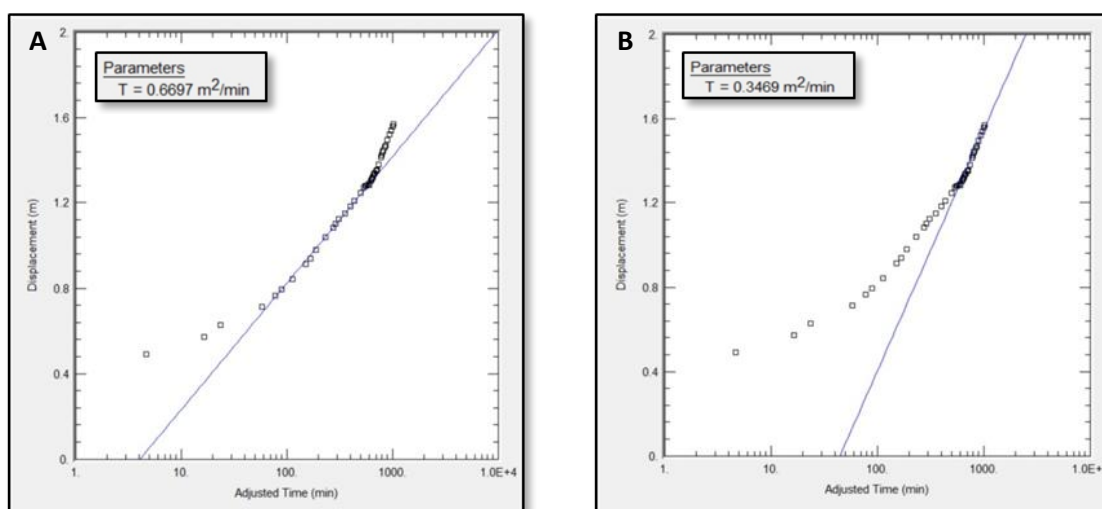


Figura 7.21 - Interpretação do ensaio de 05Ago1992, onde T é a transmissividade em m^2/min , aplicando a Equação de Cooper & Jacob (1946): A – ajuste da reta ao conjunto de dados mais iniciais; B – ajuste da reta teórica ao conjunto de dados mais tardios.

Discussão dos resultados

Dos oito ensaios de bombeamento analisados, apenas um é claramente mais longo com 1031 minutos de bombeamento e os restantes sete foram considerados ensaios de *curta duração*, com tempos de bombeamento compreendidos entre 295 e 442 minutos, sendo 366 minutos a sua média de duração. Todos os dados foram analisados utilizando as equações de Theis (1935), Cooper & Jacob (1946) e Papadopoulos & Cooper (1967), encontrando-se na Tabela 7.1 os valores de transmissividade para os sete ensaios de curta duração e na Tabela 7.2 os valores de transmissividade resultantes da interpretação dos dados do bombeamento de duração mais longa.

No conjunto de ensaios de menor duração não é visível uma correlação entre o tempo de bombeamento e os valores de transmissividade obtida para cada equação. A interpretação dos dados com a equação Papadopoulos & Cooper (1967) fornece valores de transmissividade compreendidos entre os 669-891 m²/dia, com uma média de 758 m²/dia. Os dados interpretados com o auxílio da equação de Theis (1935) apresenta um mínimo e máximo de 659 m²/dia e 972 m²/dia, respetivamente, e uma média de 833 m²/dia. Por sua vez, com o ajuste da reta teórica de Cooper & Jacob (1946) obtiveram-se valores um pouco mais baixos para o mesmo parâmetro, comparativamente com as equações anteriores, nomeadamente um mínimo de 577 m²/dia, um máximo de 768 m²/dia e a média de 684 m²/dia.

A interpretação do ensaio de bombeamento mais longo com as equações de Papadopoulos & Cooper (1967) e de Theis (1935) forneceu transmissividade bastante próximas, respetivamente 827 m²/dia e 815 m²/dia. Interpretando os mesmos dados de bombeamento com a equação de Cooper & Jacob (1946) é possível ajustar uma reta a dois conjuntos de dados diferentes, como se pode observar na Figura 7.21. O ajuste da reta de Cooper & Jacob (1946) ao primeiro conjunto de dados indica uma transmissividade de 964 m²/dia, e no segundo conjunto de dados a transmissividade é bastante mais baixa, na ordem dos 500 m²/dia.

Tal como foi observado no Capítulo 6, os ensaios de bombeamento realizados em aquíferos cársicos devem ser o mais longos possível de modo a poder-se observar os vários tipos de porosidade do sistema. O ensaio mais longo que se conseguiu individualizar na curva de esgotamento do Olho de Mira tem uma duração de bombeamento de aproximadamente 17 horas (1031 min). Parece ser possível individualizar duas retas na interpretação dos dados de bombeamento utilizando a equação de Copper & Jacob (1946), fornecendo um valor de transmissividade de 964 m²/dia ao conjunto de dados que representem o armazenamento das fraturas e galerias (troço 1 da Figura 6.9) e uma transmissividade de 500 m²/dia à zona de transição dos blocos (troço 3 da Figura 6.9).

Independentemente dos ensaios de curta ou longa duração, os valores de transmissividade são da mesma ordem de grandeza. A partir da interpretação dos dados efetuada, admite-se que a transmissividade da porção do aquífero afetada pela bombagem seja da ordem dos 760 m²/dia. Este valor de transmissividade é um pouco baixo para o que se espera de sistemas aquíferos cársicos embora aquele possa ser extremamente variável. Almeida et al., (2000) referem 4800 m²/dia o valor máximo de transmissividade no Maciço Calcário Estremenho. Relembra-se que na experiência de traçagem de Lopes et al., (2007), o valor da velocidade máxima atingida entre os sumidouros da depressão do Mindinho e a nascente do Olho de Mira foi mais baixa (55 a 70 m/h) que o obtido noutros sectores no Polje de Minde: 220 a 310 m/h no trajeto Minde – Nascente de Vila Moreira ou 280 a 460 m/h no trajeto Minde – Olhos de Água do Alviela (Crispim, 1995).

7.4.4. Interpretação da curva de recessão do poço da captação do Olho de Mira, ano hidrológico 1991/1992

Na Figura 7.13 foi apresentado o hidrograma da nascente do Olho de Mira durante um período de 303 dias (6 dezembro de 1991 a 4 de outubro de 1992). A curva de recessão mais longa do período analisado tem uma duração de, pelo menos, 177 dias, com início no dia 05 de Abril de 1992, depois de fortes eventos pluviosos com duração de 4 dias (ver 7.4.2). A curva de recessão no poço foi acompanhada durante esse período, com a exceção de 22 dias devido a problema técnicos, tal como já foi referido.

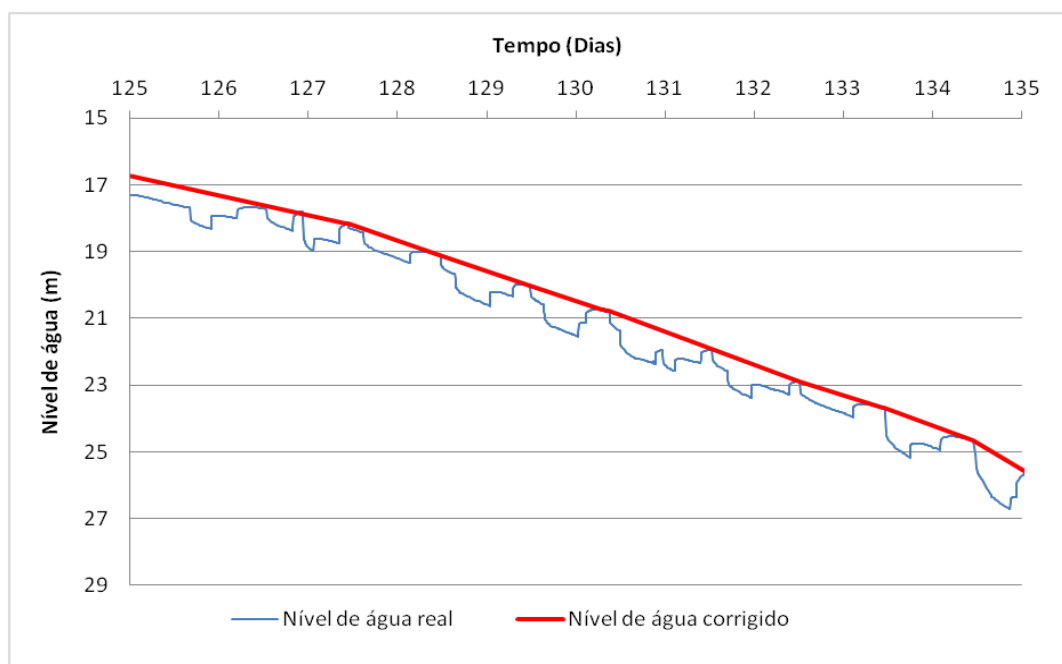


Figura 7.22 - Exemplo da correção do nível de água com os sucessivos bombeamentos (linha a azul) e nível de água corrigido (linha a vermelho).

O poço do Olho de Mira era, e continua na atualidade, a ser explorado pelos serviços municipalizados de Porto de Mós. De modo a anular as sucessivas interferências do nível resultantes das extrações das bombas aí instaladas (linha a azul da Figura 7.22), optou-se por suprimir, manualmente, todos os pontos referentes ao bombeamento e respetiva recuperação do nível de água, deixando apenas os pontos que se consideram não estarem perturbados (linha a vermelho da Figura 7.22).

Interpretação do hidrograma de poço – Curva de recessão

Shevenell (1996) e Powers & Shevenell (2000) propõem que o comportamento dos hidrogramas de piezómetros em aquíferos cársticos é semelhante ao da curva de recessão das nascentes associadas aos mesmos. A curva de recessão obtida no poço do Olho de Mira, depois de corrigida dos efeitos das extrações realizadas pelas bombas ali instaladas, foi analisada com o objetivo de obter as várias pendentes assim como parâmetros hidráulicos complementares.

Ajuste de expressões exponenciais à curva de recessão

Segundo Maillet (1905) a curva de recessão de uma nascente pode ser traduzida através da equação exponencial:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (1)$$

sendo Q_t o caudal correspondente ao tempo t , Q_0 o caudal inicial e α o coeficiente de esgotamento. Partindo do pressuposto que os hidrogramas de nascente e de poço têm o mesmo comportamento (Powers & Shevenell, 2000), o cálculo dos coeficientes de esgotamento (α) podem ser obtidos através do ajuste dos dados a uma expressão exponencial a cada um dos três subconjuntos de dados (α_1 , α_2 e α_3). Milanović (1976) interpreta os três coeficientes como caracterizando, respetivamente, o escoamento rápido das galerias (α_1), o escoamento das fissuras comunicantes e localmente bem carsificadas (α_2) e o escoamento das reservas armazenadas nas fissuras, nos depósitos detríticos presentes nas galerias e nos lagos e sifões suspensos (α_3). Os valores obtidos foram comparados com os coeficientes de esgotamento obtidos para a nascente dos Olhos de Água do Alviela por Crispim (1995).

Numa primeira abordagem foram aplicadas equações exponenciais que melhor se ajustam ao conjunto de dados que constituem a curva de recessão, determinando os coeficientes de recessão α_1 , α_2 e α_3 . Na Figura 7.23 observa-se o gráfico semi-logarítmico com o nível de água corrigido, e as respetivas equações exponenciais.

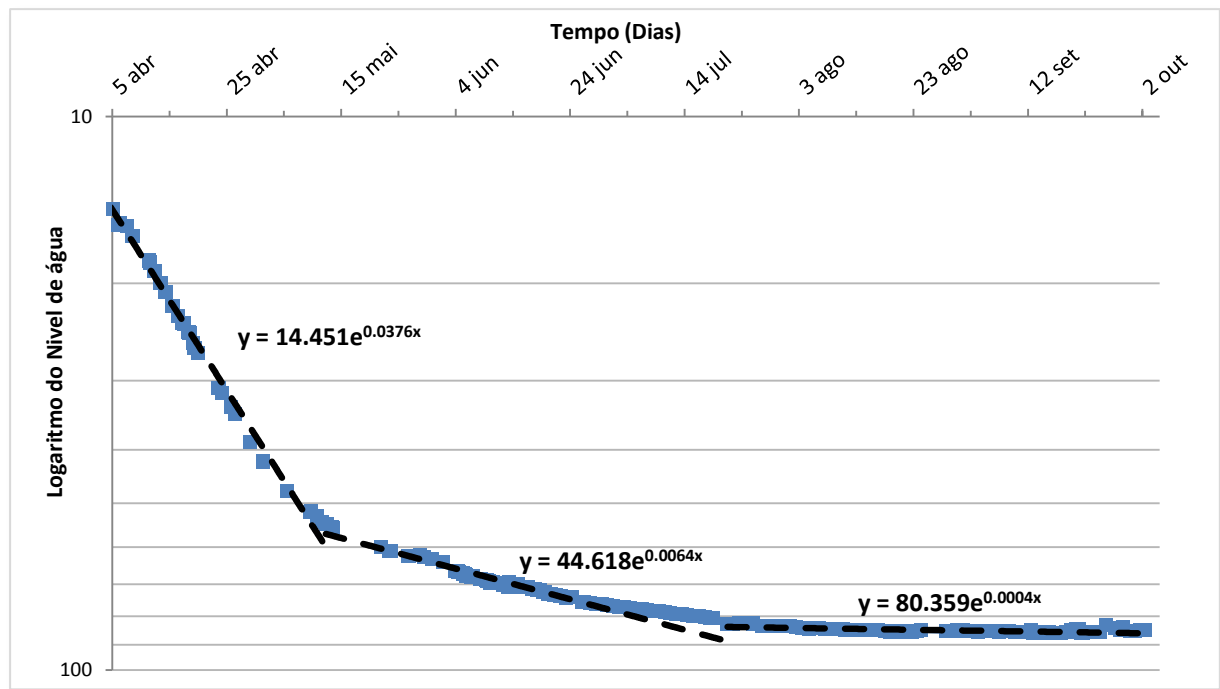


Figura 7.23 - Ajuste de expressões exponenciais ao conjunto dos dados que constituem a curva de recessão do hidrograma do poço da captação Olho de Mira, entre abril e outubro de 1992 (cerca de 180 dias).

Através da observação do gráfico presente na Figura 7.23, verifica-se que o coeficiente α_1 é de 0.0376, o α_2 é de 0.0064 e o α_3 é de 0.0004. O facto do coeficiente α_3 ser bastante baixo (0.0004) e o período de duração do α_1 ser considerável (cerca de 37 dias), levou à reinterpretação dos dados considerando utilizando apenas os primeiros 80 dias de recessão. Os novos coeficientes de esgotamento obtidos são de 0.0943 para α_1 , 0.0375 para α_2 e 0.0071 para α_3 , tal como se pode observar na Figura 7.24.

Crispim (1995) calculou os coeficientes de recessão da nascente dos Olhos de água do Alviela, para 10 anos entre 1945-1992, com os valores de caudal da nascente registados pela EPAL (empresa que explorava a nascente). Verificou então que α_1 varia entre 0.08 e 0.37, com valor médio de 0.24, α_2 varia entre 0.03 e 0.06, com valor médio de 0.04 e α_3 varia entre 0.003 e 0.008, com valor médio de 0.006. Apenas os coeficientes de esgotamento obtidos com a interpretação dos dados aos primeiros 80 dias da curva de recessão se enquadram nos intervalos de valores obtidos por Crispim (1995).

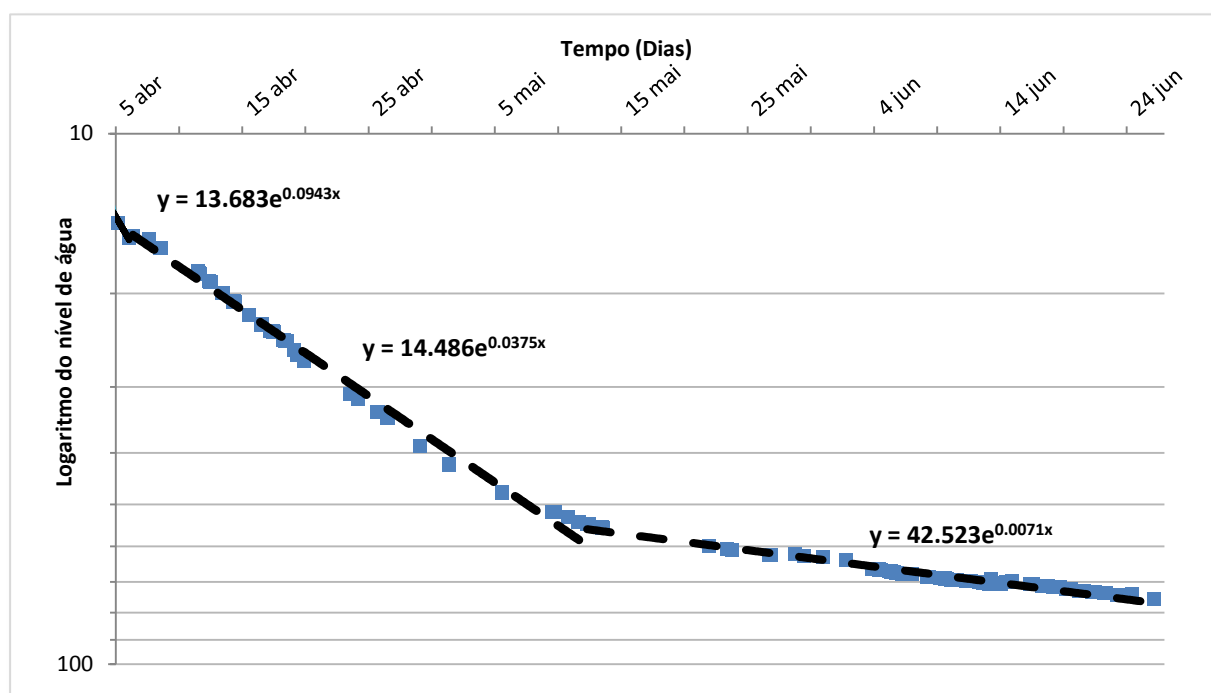


Figura 7.24 - Ajuste de expressões exponenciais à curva de recessão do hidrograma do poço Olho de Mira com uma duração de 80 dias.

Cálculo de alguns parâmetros hidráulicos através da curva de recessão

A metodologia apresentada no trabalho de Shevenell (1996) e Powers & Shevenell (2000) permite calcular alguns parâmetros hidráulicos do aquífero através da interpretação do hidrograma do poço. Os autores utilizam expressões exponenciais com auxílio de algumas correlações calculam o coeficiente de armazenamento (S), caso estejamos na presença de um aquífero livre, e a

transmissividade (T) apenas para o conjunto de dados que constituem a expressão exponencial do coeficiente α_3 , que diz respeito apenas à água com um escoamento mais lento de todo o sistema.

Cada um dos três segmentos do hidrograma tem um declive característico, consoante o efeito da precipitação que antecedeu a recessão (Figura 7.25). Esse declive (λ) é definido pelas seguintes equações de Moore (1992):

$$\frac{\ln\left(\frac{H1}{H2}\right)}{t2 - t1} = \lambda1 = \frac{\ln\left(\frac{Q1}{Q2}\right)}{t2 - t1} \quad (2)$$

$$\frac{\ln\left(\frac{H2}{H3}\right)}{t3 - t2} = \lambda2 = \frac{\ln\left(\frac{Q2}{Q1}\right)}{t3 - t2} \quad (3)$$

$$\frac{\ln\left(\frac{H3}{H4}\right)}{t4 - t3} = \lambda3 = \frac{\ln\left(\frac{Q3}{Q4}\right)}{t4 - t3} \quad (4)$$

Onde H1, H2, H3 e H4 correspondem ao nível da coluna de água no interior do poço e Q1, Q2, Q3 e Q4 correspondem ao caudal teórico no poço nos instantes t1, t2, t3 e t4. Nestas equações os parâmetros λ serão os equivalentes aos coeficientes de esgotamento das curvas de recessão das nascentes.

Da análise dos coeficientes dos vários troços do hidrograma não é possível estimar os parâmetros do aquífero dado serem desconhecidos os volumes correspondentes aos diversos tempos. Estes só poderiam ser estimados se fossem conhecidos os caudais escoados em cada intervalo de tempo. Poderia ser possível avançar mais na análise se dispusesse de dados de caudais da nascente do Olho de Mira, admitindo que este seria o único ponto de saída do subsistema onde foram feitas as observações. Deste modo, apenas podemos avançar com as razões entre os caudais de cada um dos subsistemas referidos anteriormente.

No seu trabalho, Shevenell (1996) apresenta a equação de Atkinson (1977):

$$\log\left(\frac{Q1}{Q2}\right) = \frac{T}{S}(t2 - t1) \frac{1.071}{L^2} \quad (5)$$

Onde T é a transmissividade, S é o coeficiente de armazenamento e o L é a distância do poço até à linha de separação de águas. Considerando a transmissividade calculada através dos ensaios de bombeamento na seção 7.4.4, é possível estimar o S, considerando a razão dos caudais da terceira pendente da curva de recessão, pois os ensaios de bombeamento calculados situam-se neste troço da curva correspondendo ao escoamento mais lento do sistema. O parâmetro L é retirado da Seção 7.3.1, onde se considera que a distância do poço até à linha de separação de águas da bacia de alimentação é de 4500 metros.

Os subconjuntos de valores utilizados para calcular os coeficientes de recessão através do ajuste de expressões exponenciais foram também utilizados para aplicar as equações 1, 2 e 3 de modo a obter os λ_1 , λ_2 e λ_3 e respetivos Q_1/Q_2 , Q_2/Q_3 e Q_3/Q_4 para cada um dos segmentos da curva de recessão (Figura 7.25). Os valores obtidos encontram-se na Tabela 7.3.

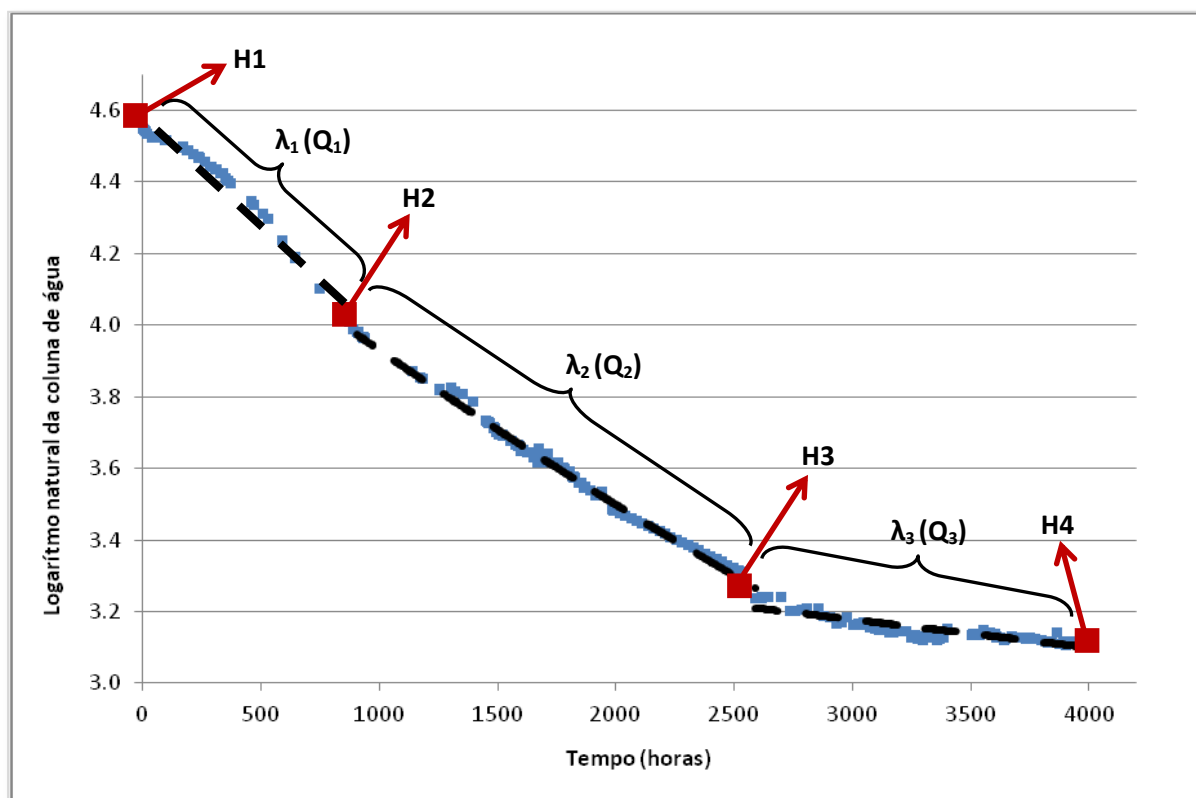


Figura 7.25 - O logaritmo natural da coluna de água versus o tempo em horas, durante a última curva de recessão do hidrograma do poço da captação do Olho de Mira em que H_x corresponde ao nível de água no poço, Q_x ao caudal teórico e λ_x ao declive da reta.

As equações exponenciais para os segmentos λ_2 e λ_3 apresentam uma correlação na ordem dos 99% e 80%, respetivamente. Para o primeiro segmento a correlação é bastante menor.

Tabela 7.3 - Valores dos tempos t_1 , t_2 , t_3 e t_4 , respetivo nível da coluna de água e resultados da aplicação das Equações 2 a 4.

Tempo (horas)	Coluna de água (m)	Declive da reta (λ)	Q_n/Q_{n+1}
0	94.63	0.00062711	1.766166
907.04	53.58		
		0.00042973	2.06268057
2591.84	25.49		
		0.0000914	1.1385438
4011.48	22.39		

Os resultados obtidos com a Equação 5 para o terceiro segmento da curva de recessão (λ_3) podem ser observados na Tabela 7.4, com uma transmissividade na ordem dos 760 m²/dia.

Tabela 7.4 - Valores utilizados e resultados obtidos para o cálculo do Coeficiente de Armazenamento (S)

Quadro Resumo	
Log (Q3/Q4)	0.05635
L ² (m ²)	20250000
T (m ² /dia)	760
T (m ² /hora)	31.67
S	4,22x10⁻²

Admitindo uma transmissividade na ordem dos 760 m²/dia, utilizando a metodologia de Shevenell (1996) e Powers & Shevenell (2000), o coeficiente de armazenamento referente ao terceiro segmento da curva de recessão (λ_3) que diz respeito ao escoamento dos depósitos detríticos presentes nas galerias e nos lagos e sifões suspensos na ordem dos 4%.

Discussão dos resultados

A partir dos dados da última curva de recessão registada no hidrograma do poço da captação do olho de Mira, e depois de corrigidas as interferências do grupo de bombas instaladas no poço, foi ajustada a equação exponencial de Maillet (1905) aos três conjuntos de dados que podem representar o escoamento dos subsistemas do aquífero cársico a fim de obter o respetivo coeficiente de esgotamento (α). Numa primeira abordagem, a equação exponencial foi aplicada a todo o conjunto de dados, mais de 180 dias, obtendo-se os coeficientes: $\alpha_1 = 0,0376$, o $\alpha_2 = 0,0064$ e o $\alpha_3 = 0,0004$. Por se considerar que o coeficiente de esgotamento α_3 é excessivamente baixo, reinterpretou-se os dados eliminando este segmento de reta, resultando então os coeficientes: $\alpha_1 = 0,0943$, o $\alpha_2 = 0,0375$ e o $\alpha_3 = 0,0071$.

Com a exclusão dos últimos dados da curva de recessão do hidrograma do poço Olho de Mira obtêm-se valores mais próximos aos obtidos por Crispim (1995) na nascente dos Olhos de Água do Alviela em que α_1 varia entre 0,08 e 0,37, α_2 varia entre 0,03 e 0,06 e α_3 varia entre 0,003 e 0,008.

Assumindo que a interpretação de apenas 80 dias da curva de recessão é a opção mais correta poder-se-á atribuir ao $\alpha_3 = 0,0004$ da curva de recessão de 180 dias um outro significado, nomeadamente a de um presumível subsistema com características próprias.

Na aplicação da metodologia de Shevenell (1996) e Powers & Shevenell (2000) foi considerada a curva de recessão do hidrograma na íntegra. Assumimos que a transmissividade do aquífero onde

está inserido o poço Olho de Mira seja da ordem dos 760 m²/dia. O valor obtido para o coeficiente de armazenamento é de 4%, valor que se situa na gama de valores típicos dos aquíferos cársicos.

7.5. Considerações finais e trabalhos futuros

Com auxílio de um limnógrafo de flutuador, parte do ano hidrológico de 1991/1992, foi registado em contínuo a evolução do nível de água no poço Olho de Mira entre dia 06 de dezembro de 1991 e 04 outubro de 1992, totalizando 7269 horas (303 dias).

Para o período de interesse, foram coletados dados de precipitações diárias através da plataforma *online* do SNIRH, em três estações udométricas relativamente perto da bacia de alimentação do Olho de Mira (Crespos (16E/01UG), Minde (16E/03UG) e Serra de Santo António (16E/04U)). Com os dados disponíveis apenas se consegue afirmar que nos eventos onde ocorre influência do nível, essa influência é sempre observada no mesmo dia do início do evento. Pelo que uma maior periodicidade dos dados de precipitação (talvez horária) deverá ajudar a quantificar o tempo de resposta do sistema aos eventos de recarga.

Do cruzamento dos dados da precipitação e do hidrograma do poço é possível concluir que precipitações inferiores a 15 mm não conseguem gerar uma recuperação no nível de água, independentemente da cota do nível na captação e da época do ano, indicando uma boa capacidade de regularização do sistema. Por outro lado, eventos pluviosos mais extremos têm uma rápida resposta no sistema indicando uma componente vertical importante (como os conhecidos sumidouros da depressão do Mindinho). Tal fenómeno já tinha sido demonstrado no quimiograma do Olho de Mira no trabalho de Crispim (1995).

No poço Olho de Mira estão instaladas bombas que extraem água para abastecer as populações locais. Foram individualizados oito ensaios de bombeamento no final da curva de recessão do hidrograma interpretados com as equações de Theis (1935), Cooper & Jacob (1946) e Papadopoulos & Cooper (1967) em que apenas um deles é um pouco mais longo. A média da transmissividade dos ensaios de curta duração é de 760 m²/dia e no ensaio de longa duração com as equações de Theis (1935) e Papadopoulos & Cooper (1967) a transmissividade é cerca de 820 m²/dia. Estes valores de transmissividades são baixos para o que é expectável dos sistemas aquíferos cársicos. A título de exemplo, Almeida et al., (2000) refere 4800 m²/dia um valor máximo de transmissividade no Maciço Calcário Estremenho. No entanto, na experiência de traçagem de Lopes et al., (2007), o valor da velocidade máxima atingida entre os sumidouros da depressão do Mindinho e a nascente do Olho de Mira também foi mais baixa (55 a 70 m/h) comparativamente a outros sectores do Polje de Minde: 220 a 310 m/h no trajeto Minde – Nascente de Vila Moreira ou 280 a 460 m/h no trajeto Minde – Olhos de Água do Alviela (Crispim, 1995).

Shevenell (1996) e Powers & Shevenell (2000) propõem que o comportamento dos hidrogramas de piezómetros em aquíferos cársticos é semelhante ao da curva de recessão das nascentes associadas aos mesmos. Os dados da última curva de recessão registada no hidrograma do poço da captação do Olho de Mira foram ajustados à equação exponencial de Maillet (1905). Os coeficientes de esgotamento são comparáveis aos da nascente dos Olhos de Água do Alviela quando são apenas considerados 80 dias de recessão. Colocando assim a hipótese de estarmos na presença de um outro sub-sistema representado pelo α_3 da curva de recessão mais longa e com características próprias.

O interesse na continuação do estudo da variação do nível de água no poço da captação do Olho de Mira torna-se ainda mais importante com o tratamento destes dados, assim como de toda a bacia de alimentação. Trabalhos mais imediatos prendem-se com os que de alguma forma não foram contemplados no presente trabalho como a aquisição dos valores de precipitação com maior resolução, a realização de ensaio de bombeamento de maior duração, um controlo nos volumes extraídos, um acompanhamento na evolução dos caudais da nascente, para além da aquisição de novos valores da variação do nível de água de modo a obter outras comparações. Trabalhos mais abrangentes passam pela prospeção de cavidades na bacia de alimentação do Olho de Mira, com circulação ativa, e perceber a sua relação com a gruta do Olho de Mira.

7.6. Referências bibliográficas

- Almeida, C., Mendonça, J. J. L., Jesus, M. R., & Gomes, A. J. (2000). *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. Lisboa: Centro de Geologia da Universidade de Lisboa e Instituto da Água.
- Almeida, C. A., Silva, M. L., & Crispim, J. A. (1995). COST 65 – National Report for Portugal, Hydrogeological Aspects of Groundwater Protection in Karstic Areas, Final Report (EUR 16547 EN), 221-220.
- AQTESOLV. (2007). AQTESOLV for windows - version 4.50 - DEMO. <http://www.aqtesolv.com>.
- Atkinson, T. C. (1977). Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in Mendip Hills, Somerset (Great Britain) *Journal of Hydrology*, 35, 93-100.
- Camarate França, J., & Zbyszewski, G. (1963). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000 e Notícia Explicativa da Folha 26-B, Alcobaca*. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.
- Canais, F., & Fernandes, J. (1999). *Lapas e algares da Serra de Santo António*. Torres Novas: Subterra: Grupo de Espeleologia.
- Compan, Y. (2008). Expédition "Planalto 2008" au Portugal. *SpéléOc*, 118, 15-18.
- Cooper, H. H., & Jacob, C. E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Am. Geophys. Union Trans.*, 27, 526-534.
- Crispim, J. A. (1986). Traçagens com Uranina em Minde. *2º Congresso Nacional de Geologia. Maleo*, 2(13), 16-17.
- Crispim, J. A. (1987). Evolução da hidrologia subterrânea na Gruta de Moinhos Velhos (Mira de Aire). *Algar - Boletim da Sociedade Portuguesa de Espeleologia*(1), 3-8.

- Crispim, J. A. (1992). Características cárscicas das rochas carbonatadas da região central do Maciço Calcário Estremenho (Portugal). *Algar - Boletim da Sociedade Portuguesa de Espeleologia*(3), 9-18.
- Crispim, J. A. (1993). Algumas considerações sobre a estrutura geológica dos poljes de Alvados e Minde (Estremadura - Portugal) *Algar - Boletim da Sociedade Portuguesa de Espeleologia*(4), 13-26.
- Crispim, J. A. (1995). *Dinâmica cárscica e implicações ambientais nas depressões de Alvados e Minde*. (Tese de Doutoramento), Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Crispim, J. A. (2000). Geomorfologia. In G. Manuppella (Ed.), *Notícia Explicativa da Folha 27-A, Vila Nova de Ourém (2ª Edição)*. (pp. 7-17). Lisboa: Instituto Geológico e Mineiro.
- Crispim, J. A. (2007). Almonda and Alviela Karst Springs. Field trip guide. *M-05 Mid-congress Technical Visit. International Conference Groundwater and Ecosystems. Lisboa*.
- Crispim, J. A. (2010). O sistema aquífero do Maciço Calcário Estremenho: Características e importância das traçagens para o conhecimento da circulação subterrânea *Tágides - Os Aquíferos das Bacias Hidrográficas do Rio Tejo e das Ribeiras do Oeste – Saberes e Reflexões*, 7, 158-166.
- Crispim, J. A., Constantino, R., & Duarte, J. (2014). Espeleomergulho nas Grutas de Mira de Aire: importância para o conhecimento da rede espeleológica, a captação de água subterrânea e a divulgação das grutas turísticas. In J. M. Calaforra & J. J. Durán (Eds.), *Cuevatur. Primer Congreso Iberoamericano y Quinto Congreso Español sobre Cuevas Turísticas* (Vol. 4. Geoespeleologia, pp. 371-378). Aracena: Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.
- Crispim, J. A., & Monteiro, A. R. (1990). Nota preliminar sobre a contaminação de algumas nascentes do Maciço Calcário Estremenho *Geolis*, IV(1 e 2), 173-176.
- Fernandes Martins, A. (1949). *Maciço Calcário Estremenho – Contribuição para um estudo de Geografia Física* (Tese de Doutoramento), Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Fleury, E. (1940). Les eaux du groupe de l'Alviela ou des grandes résurgences des calcaires jurassiques des Olhos d'Água, d'Ota et d'Alenquer. *Relatório sobre o tratamento de águas de Lisboa* (Vol. Anexo IV, pp. 129-191). Lisboa: M.O.P.C.
- INE. (2013). Censur 2011 - População residente por freguesias, CAOP 2013. http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos_quadros.
- Lopes, L. M., Crispim, J. A., & Henriques, J. M. (2007). Traçagem da circulação subterrânea entre a depressão do Mindinho e o Polje de Minde (Mira de Aire, Portugal). In J. Brandão, C. Calado, & F. Sá Couto (Eds.), *Simpósio Ibero-Americano sobre Património geológico, arqueológico e mineiro em regiões cárscicas* (pp. 13-17). Batalha: SEDPGYM - Sociedad Espanola para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero.
- Machado, A. B., & Machado, B. B. (1948). Inventário das Cavernas Calcárias de Portugal *I Congr. Nac. C. Nat* (Vol. 36, pp. 444-473). Porto: Publ.Inst. Zool. Dr. Aug. Nobre
- Maillet, E. (1905). *Essais d'Hydraulique souterraine et fluviale [Underground and river hydrology]*. Paris: Hermann.
- Manuppella, G., Moreira, J. C., Costa, J. R. G., & Crispim, J. A. (1985). Calcários e dolomitos do Maciço Calcário Estremenho. *Estudos, Notas e Trabalhos*, 27, 3-48.
- Manuppella, G., Telles Antunes, M., Almeida, C. A. C., Azerêdo, A. C., Barbosa, B., Cardoso, J. L., Crispim, J. A., Duarte, V. L., Henriques, M. H., Martins, L. R., Ramalho, M. M., Santos, V. F. & Terrinha, P. (2000). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000 e Notícia Explicativa da Folha 27-A, Vila Nova de Ourém (2ª Edição ed.)*. Lisboa: Instituto Geológico e Mineiro.

- Milanovic, P. T. (1976). Water regime in deep karst—Case study of the Ombla Spring drainage area. In V. Yevjevich (Ed.), *Karst hydrology and water resources, Proceedings of the U.S.-Yugoslavian Symposium, Dubrovnik, 1975* (pp. 165-191). Littleton, Colo.: Water Resources Publication.
- Moore, G. (1992). Hydrograph Analysis in a Fractured Rock Terrane. *Ground Water*, 30(3), 390-395.
- Oliveira, M. M., & Lobo-Ferreira, J. P. (1994). *Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal: Metodologias de Análise da Recarga de Aquíferos. Relatório 319/94-GIAS* Lisboa: LNEC.
- Papadopoulos, I. S., & Cooper, H. H. (1967). Drawdown in a well of large diameter. *Water Resources Research*, 3, 241-244.
- Paradela, P. (1971). *Ligação de uma galeria em fundo de poço ao algar de Olho de Água, localizado por geofísica, em Mira de Aire*. Paper presented at the I Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica, Lisboa.
- Powers, J. G., & Shevenell, L. (2000). Transmissivity Estimates from Well Hydrographs in Karst and Fractured Aquifers. *Ground Water*, 38(3), 361-369.
- Rodrigues, M. L. (2012). Classificação e tipologia dos lapiás. Contributo para uma terminologia das formas cársticas. *Finisterra*, XLVII(93), 147-158.
- Shevenell, L. (1996). Analysis of well hydrographs in a karst aquifer: estimates of specific yields and continuum transmissivities. *Journal of Hydrology*, 174(3-4), 331-355. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02761-0](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(95)02761-0)
- SPE (1974). *Inventário das Grutas de Portugal – 1. Vila Nova de Ourém*. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Espeleologia.
- Terrinha, P., Carvalho, J., & Manuppella, G. (2000). Tectónica. In G. Manuppella (Ed.), *Notícia Explicativa da Folha 27-A, Vila Nova de Ourém (2ª Edição)*. (pp. 101-111). Lisboa: Instituto Geológico e Mineiro.
- Theis, C. V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Transactions American Geophysical Union*, 16, 519-524.
- Zbyszewski, G., & Almeida, F. M. (1960). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000 e Notícia Explicativa da Folha 26-D, Caldas da Rainha*. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.
- Zbyszewski, G., Manuppella, G., Ferreira, O. V., Mouterde, R., Ruget-Perrot, C., & Torre de Assunção, C. (1974). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000 e Notícia Explicativa da Folha 27-A, Vila Nova de Ourém*. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.
- Zbyszewski, G., Manuppella, G., & Veiga Ferreira, O. (1971). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000 e Notícia Explicativa de Folha 27-C, Torres Novas*. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.

Anexos

O presente trabalho contém cinco anexos: os dois primeiros fazem parte do Capítulo 2 e os restantes três fazem parte do Capítulo 7.

O Anexo 1 apresenta a compilação da informação geral dos sistemas aquíferos com comportamento cársico definidos no trabalho de Almeida et al., (2000).

O Anexo 2 corresponde à seleção de captações inseridas em regiões carbonatadas e que serviram de base aos gráficos e tabelas apresentados no Capítulo 2, relativamente à proveniência da água subterrânea distribuída em Portugal.

No Anexo 3 encontram-se os parâmetros desconformes ao Decreto-Lei 306/2007 de 27 de agosto em águas colhidas na captação do Olho de Mira. Este Decreto-Lei estabelece os limites admissíveis da qualidade da água distribuída para consumo humano.

A tabela do Anexo 4 refere-se às precipitações diárias registadas nas três estações udométricas localizadas nas imediações da bacia de alimentação do Olho de Mira e a respetiva média.

O Anexo 5 corresponde aos dados de base utilizados para interpretação dos ensaios de bombeamento apresentados na Tabela 7.1 e Tabela 7.2.

Anexo 1 – Sistemas Aquíferos com escoamento cársico

Sistema Aquífero	Formações aquíferas dominantes	Características Gerais	Produtividade (l/s)	Área (Km ²)	Parâmetros Hidráulicos
Maciço Antigo					
A2 - Escusa	Calcários Dolomíticos de Escusa (Devónico médio)	Sistema aquífero cársico, com porosidade dupla	9.2	7.7	Valores de transmissividade mais frequentes a variarem entre 123 e 474 m ² /dia
A3 – Monforte-Alter do Chão	Calcários e Dolomitos cristalinos (Câmbrico inferior); Complexo Básico de Alter do Chão-Cabeço de Vide	Sistema aquífero livre, cársico/fissurado nos calcários e fracturado nos gabros.	Calcários: mediana=3,3; Gabros: média=7,1	98	--
A4 – Estremoz-Cano	Formação Dolomítica de Estremoz (Câmbrico); Formação Vulcano-Sedimentar de Estremoz (Mármore de Estremoz) (Ordovícico); Calcários do Cano-Casa Branca (Plistocénico)	Aquífero superior poroso livre, na área do Cano e um aquífero inferior cársico livre, semi-confinado a confinado	2.5	202	--
A5 – Elvas-Vila Boim	Formação Carbonatada de Elvas (Câmbrico)	Sistema aquífero complexo, com características mistas de cársico e fissurado.	1.7	113	Região Vila Boim, varia entre 7 e 14 m ² /dia; a N de Casas Velhas, T=153 m ² /dia. Coeficiente de armazenamento=1,4x10 ⁻²
A6 – Viana do Alentejo-Alvito	Mármore Impuros de Alvito-Viana do Alentejo (Câmbrico inferior)	Sistema aquífero com características mistas de aquífero cársico e fissurado apresentando-	Caudais entre 15,6 e 30,3	18.4	Transmissividade entre 2400 e 3960 m ² /dia; coeficiente de armazenamento das fracturas

Sistema Aquífero	Formações aquíferas dominantes	Características Gerais	Produtividade (l/s)	Área (Km ²)	Parâmetros Hidráulicos
		se livre nalgumas zonas e confinado noutras			entre 10 ⁻² e 10 ⁻¹ e nos blocos de rocha calcária, na ordem dos 10 ⁻⁴ a 10 ⁻³
A10 – Moura-Ficalho	Dolomias de Ficalho (Câmbrico); Complexo Vulcano-Sedimentar de Ficalho-Moura (Ordovícico)	Aquífero livre a confinados, com comportamento cárlico e fissurado.	8.3	185.8	Aquífero Moura-Ficalho: transmissividade entre 617 e 3532 m ² /dia; coeficiente de armazenamento=0,21
Orla Ocidental					
O3 – Cárlico da Bairrada	Camadas de Coimbra (Sinemuriano-Lotaringiano), Calcários margosos de Lemedo (Domeriano médio-superior)	Sistema cárlico, com heterogeneidade acentuada	3.2	316	Transmissividades (m ² /dia) entre 16 e 600
O4 – Anã-Cantanhede	Calcários de Anã e Calcários de Andorinha (Jurássico médio)	Sistema aquífero cárlico	1.3	40	Transmissividade entre 5 e 358 m ² /dia
O8 - Verride	Calcários e margas (Dogger)	Sistema cárlico, de produtividade média	O caudal de uma nascente varia entre 1,6 e 9	15	--
O9 – Penela-Tomar	Dolomitos, calcários e calcários dolomíticos (Liásico)	Sistema aquífero cárlico	Mediana=1,7 (fora da zona de exsurgências)	245	Transmissividade a variar entre 1 e 100 m ² /dia (captações com pequeno caudal); entre 350 e 850 m ² /dia (captações perto das exsurgências)
O11 – Sicó-Alvaiázere	Calcários e dolomitos (Batoniano e Bajociano)	Sistema aquífero cárlico, muito heterogéneo	4	332	A transmissividade (m ² /dia) varia entre 4 e 570
O18 - Maceira	Calcários (Lias e Dogger)	Sistema cárlico	Três valores: 2,2; 14,5; 17,8	5	150 a 350 m ² /dia
O20 – Maciço Calcário Estremenho	Formações do Dogger e do Malm	Sistema aquífero cárlico, muito complexo.	Mediana=0,8, com mínimo=0 e máximo=20	767.6	Transmissividade entre 1 e 4800 m ² /dia

Sistema Aquífero	Formações aquíferas dominantes	Características Gerais	Produtividade (l/s)	Área (Km ²)	Parâmetros Hidráulicos
O24 - Cesareda	Camadas de Cabaços e de Montejunto (Jurássico sup.), Calcários (Jurássico médio)	Sistema aquífero cársico	2,8; 5,6; 20; 25	17	Transmissividade: 518 m ² /dia; coeficiente de armazenamento: 2x10 ⁻²
O26 – Ota-Alenquer	Formação de Ota e Alenquer (Jurássico sup.)	Sistema aquífero cársico	Alenquer: entre 100 e 280; Ota: entre 0 e 140	9.4	Transmissividade entre 1000 e 14700 m ² /dia
O28 – Pisões-Atrozela	Margo-calcários Xistosos, Calcários Nodulares de Farta Pão (Jurássico sup.); Calcários e margas com <i>A. lusitanica</i> , <i>M. purbeckensis</i> e <i>Trocholina</i> incluindo os níveis de Calcários amarelo-nanquim (Cretácico inf.)	Sistema aquífero cársico	Entre 5 e 20	22	Caudal específico entre 0,01 e 1 l/s.m
O32 - Sines	Dolomitos, margas dolomíticas e calcários de Fateota (Jurássico inf.); Calcários do Rodeado, Calcários de Monte Branco (Jurássico médio); Calcários, margas e conglomerados de Deixa-O-Resto (Jurássico sup.); Níveis marinhos do litoral (Miocénico); Areias com seixos da planície litoral (Plio-Plistocénico)	Sistema multiaquífero, calcários e dolomitos do Jurássico com comportamento cársico, sobreposto por um aquífero multicamada, poroso, livre a confinado	Formações jurássicas: mediana=15	250	Formações jurássicas: valores mais frequentes de transmissividade entre 44 e 1118 m ² /dia
Orla Meridional					
M1 - Covões	Dolomitos e calcários dolomíticos (Jurássico inf.), Calcários e Dolomitos de Almádena (Jurássico médio), Calcários da Praia do Tonel (Jurássico sup.)	Aquífero cársico, livre a confinado	15.5	22.6	Transmissividade entre 500 e 600 m ² /dia
M2 – Almádena-Odeáxere	Dolomitos e Calcários Dolomíticos de Espiche (Jurássico inf.), Calcários e Dolomitos de Almádena (Jurássico médio)	Aquífero cársico, livre a confinado	5.6	63.5	Mediana da transmissividade: 984 m ² /dia
M5 – Querença-Silves	Formação de Picavessa (Jurássico inf.); Calcários e Dolomitos de Almádena (Dogger); Calcários de S. Romão, Calcários com Nódulos de Sílex da Jordana, Calcários Bioconstruídos do Cerro da	Sistema aquífero cársico, livre a confinado	11.1	318	Transmissividade desde 155 m ² /dia a W de Querença e entre 3000 e 30000 m ² /dia em Vale da

Sistema Aquífero	Formações aquíferas dominantes	Características Gerais	Produtividade (l/s)	Área (Km ²)	Parâmetros Hidráulicos
	Cabeça, Dolomitos e Calcários Dolomíticos de Santa Bárbara de Nexe, Calcários de Escarpão, Calcários com <i>Anchispirocyclus lusitanica</i> (Jurássico sup.)				Vila. Coeficiente de armazenamento a variar entre 5×10^{-2} e 3×10^{-2}
M8 – São Brás de Alportel	Calcários Oolíticos com <i>Lucasella</i> e <i>Timidonella</i> de Malhão (Jurássico médio); Calcários de S. Romão, Calcários Bioconstruídos de Cerro da Cabeça, Dolomitos e Calcários Dolomíticos de Santa Bárbara de Nexe (Jurássico sup.)	Sistema aquífero cársico, livre a confinado	4.2	34.4	--
M9 – Almansil-Medronhal	Dolomitos e Calcários Dolomíticos de Santa Bárbara de Nexe, Calcários de Escarpão, Calcários com <i>Anchispirocyclus lusitanica</i> (Jurássico sup.)	Sistema aquífero cársico, livre a confinado	7	23.4	Transmissividade: 4000 m ² /dia Coeficiente de armazenamento: 4%
M11 – Chão de Cevada-Quinta de João de Ourém	Dolomitos de Chão de Cevada, Calcários cristalinos de Pão Branco (Cretácico)	Sistema aquífero cársico, livre a confinado	6	5.3	Transmissividade: 500 e 600 m ² /dia
M13 – Peral-Moncarapacho	Calcários com Nódulos de Sílex de Jordana, Calcários Bioconstruídos de Cerro de Cabeça, Calcários de Escarpão (Jurássico sup.)	Sistema aquífero cársico, livre a confinado	2.8	44	--
M14 - Malhão	Formação de Boavista (Jurássico inf. a médio); Formação de Malhão (Jurássico médio)	Sistema aquífero cársico, com escassa capacidade de armazenamento e poder regulador	14.7	12	--
M16 – São Bartolomeu	Formação de Boavista (Jurássico inf. a médio)	Aquífero cársico confinado ou semiconfinado, a livre	8.2	10.6	Transmissividade: 3700 m ² /dia; Coeficiente de armazenamento: 8×10^{-3}

Anexo 2 – Captações para abastecimento público inseridas em regiões carbonatadas (INSAAR 2010)

Unidade Hidrogeológica	Concelho	Freguesia	Situação de Funcionamento	População Total Servida (Hab)	Concelhos Servidos	Volume Anual Captado (m ³)
Maciço Antigo	Alandroal	Alandroal (Nossa Senhora da Conceição)	6 Captações em Func. Recurso 6 Captações em Serviço	17522	Alandroal	526068
Maciço Antigo	Alter do Chão	Alter do Chão	9 Captações em Serviço	2556	Alter do Chão	132276
Maciço Antigo	Alvito	Alvito	1 Captação em Serviço	1230	Alvito	122336
Maciço Antigo	Borba	Borba (Matriz) e Rio de Moinhos	5 Captações em Serviço; 3 Captações em Construção; 3 Captações em Func. de Recurso	17622	Borba; Vila Viçosa	959291
Maciço Antigo	Castelo de Vide	Santa Maria da Devesa	2 Captações com Func. de Recurso	0	Castelo de Vide	0
Maciço Antigo	Elvas	Vila Boim; São Brás e São Lourenço	6 Captações em Serviço	2226	Elvas	223926
Maciço Antigo	Estremoz	São Domingos de Ana Loura; Estremoz (Santa Maria); Glória; Santa Vitória do Ameixial; São Lourenço de Mamporcão; Arcos; Santo Estêvão; São Bento do Ameixial	10 Captações em Serviço	9035	Estremoz	1072044

Unidade Hidrogeológica	Concelho	Freguesia	Situação de Funcionamento	População Total Servida (Hab)	Concelhos Servidos	Volume Anual Captado (m ³)
Maciço Antigo	Marvão	São Salvador da Aramenha	4 Captações Em Serviço 1 Captação com Func. de recurso	8419	Marvão	935537
Maciço Antigo	Monforte	Monforte; Vaiamonte	8 Captações em Serviço	1916	Monforte	129311
Maciço Antigo	Moura	Sobral da Adiça; Moura (Santo Agostinho)	2 Captações em Serviço	10546	Moura	1075138
Maciço Antigo	Santiago do Cacém	Santo André	3 Captações em Serviço	4982	Santiago do Cacém	952957
Maciço Antigo	Serpa	Vila Verde de Ficalho	3 Captações em Serviço	1482	Serpa	16608
Maciço Antigo	Viana do Alentejo	Viana do Alentejo	3 Captações em Serviço	2011	Viana do Alentejo	226162
Maciço Antigo	Vila Viçosa	Pardais; Bencatel; Vila Viçosa (Conceição)	6 Captações em Serviço 2 Captações com func. de recurso	9774	Vila Viçosa	354287
Orla Meridional	Albufeira	Paderne	6 Captações com Func. de Recurso	0	Albufeira	180244
Orla Meridional	Lagoa	Estômbar	2 Captações com Func. de Recurso	0	-	385421
Orla Meridional	Loulé	Almancil	11 Captações em Serviço 5 Captações com Func. de Recurso	5120	Loulé	421966
Orla Meridional	São Brás de Alportel	São Brás de Alportel	4 Captações em Serviço; 2 Captações com Func. de Recurso	1200	São Brás de Alportel	137147
Orla Meridional	Silves	Alcantarilha; Silves	8 Captações com Serviço 4 Captações com Func. de recurso	59190	Vila do Bispo; Aljezur; Monchique; Lagos; Loulé; Lagoa; Silves; Albufeira; Portimão	10011987
Orla Meridional	Tavira	Santo Estêvão; Santa Catarina da Fonte do Bispo	2 Captações em Serviço 3 Captações com Func. de recurso	80	Tavira	169973
Orla Meridional	Vila do Bispo	Sagres	2 Captações em Serviço	1842	Vila do Bispo	368395

Unidade Hidrogeológica	Concelho	Freguesia	Situação de Funcionamento	População Total Servida (Hab)	Concelhos Servidos	Volume Anual Captado (m ³)
Orla Ocidental	Alcanena	Louriceira	2 Captações em Serviço	7707	Sobral de Monte Agraço; Arruda dos Vinhos; Alenquer; Mafra; Torres Vedras; Vila Franca de Xira; Odivelas; Oeiras; Amadora; Cascais; Loures; Sintra; Lisboa; Santarém; Azambuja; Alcanena	1941044
Orla Ocidental	Alcobaça	Aljubarrota (Prazeres)	2 Captações em Serviço	32897	Alcobaça	1574724
Orla Ocidental	Alenquer	Alenquer (Triana); Ota	2 Captações em Serviço	158307	Sobral de Monte Agraço; Arruda dos Vinhos; Alenquer; Mafra; Torres Vedras; Vila Franca de Xira; Odivelas; Oeiras; Amadora; Cascais; Loures; Sintra; Lisboa	13769312
Orla Ocidental	Anadia	Arcos	2 Captações em Serviço	24157	Anadia	2365688
Orla Ocidental	Ansião	Alvorge	1 Captação em Serviço	748	Ansião	62434
Orla Ocidental	Bombarral	Pó	2 Captações em Serviço	10219	Bombarral	576536
Orla Ocidental	Cantanhede	Cadima	3 Captações em Serviço	38431	Cantanhede	4003301
Orla Ocidental	Condeixa-a-Nova	Condeixa-a-Velha; Ega	2 Captações Em Serviço 1 Captação com Func. de Recurso	9376	Condeixa-a-Nova	1117041
Orla Ocidental	Grândola	Melides	1 Captação em Serviço	2025	Grândola	169460
Orla Ocidental	Leiria	Cortes	2 Captações em Serviço	4748	Leiria	344146
Orla Ocidental	Mealhada	Casal Comba; Ventosa do Bairro; Mealhada	3 Captações em Serviço	8356	Mealhada	454826
Orla Ocidental	Montemor-o-Velho	Abrunheira	1 Captação em Serviço	2412	Montemor-o-Velho	160314
Orla Ocidental	Oliveira do Bairro	Oliveira do Bairro	1 Captação em Serviço	2218	Oliveira do Bairro	135257
Orla Ocidental	Penela	Rabaçal; Penela (Santa Eufémia); Cumeeira; Podentes; Penela (São Miguel)	9 Captações em Serviço	1913	Penela	84216
Orla Ocidental	Pombal	Abiul; Redinha	4 Captações em Serviço	18452	Pombal	1583598

Unidade Hidrogeológica	Concelho	Freguesia	Situação de Funcionamento	População Total Servida (Hab)	Concelhos Servidos	Volume Anual Captado (m ³)
Orla Ocidental	Porto de Mós	Mira de Aire; Porto de Mós (São João Baptista); Pedreiras	4 Captações em Serviço	8080	Porto de Mós	1017587
Orla Ocidental	Santarém	Amiais de Baixo; Abrã	3 Captações em Serviço	3335	Santarém	477942
Orla Ocidental	Sines	Sines	9 Captações em Serviço	10100	Sines	2146152
Orla Ocidental	Soure	Brunhós; Pombalinho	2 Captações em Serviço	392	Soure	29583
Orla Ocidental	Tomar	Sabacheira	2 Captações em Serviço	25963	Tomar	2450488
Orla Ocidental	Torres Novas	Pedrogão	3 Captações em Serviço	876	Torres Novas	53566

Anexo 3 – Parâmetros desconformes ao Decreto-Lei 306/2007 de 27 de agosto em águas colhidas na captação Olho de Mira (318/C83)

Data	Coliformes Fecais (UFC/100ml)	Coliformes Totais (UFC/100ml)	E.Coli (UFC/100 ml)	Enterococos intestinais (UFC/100 ml)	Ferro total (mg/l)	FLAG
19/04/2005 00:00	200	100	-	10	0.1	(<)
12/10/2005 00:00	-	-	-	-	-	
13/10/2005 00:00	29	45	-	47	0.1	(<)
08/05/2006 00:00	10	6	-	2	0.1	(<)
17/10/2006 00:00	15	26	-	30	-	
21/03/2007 00:00	8	10	-	2	0.1	(<)
19/11/2007 00:00	-	-	-	-	0.1	(<)
21/04/2008 00:00	221	247	-	85	0.1	(<)
03/12/2008 14:25	256	348	-	155	0.05	(<)
27/04/2009 00:00	10	15	-	0	0.01	(<)
21/04/2010 15:00	89	92	-	4	0.01	(<)
07/12/2010 12:15	368	498	-	138	-	
11/04/2011 11:35	48	85	-	24	-	
14/11/2011 11:50	210	370	-	102	-	
20/03/2012 13:15	1	1	-	2	-	
10/12/2012 12:00	-	-	-	-	0.023	
03/04/2013 12:15	-	-	550	13	-	
03/03/2014 11:30	-	-	130	76	-	

(<) - Menor que

Dados obtidos através do site <http://snirh.pt> em novembro de 2015.

Anexo 4 - Precipitação diária das estações udométricas nas imediações da bacia de alimentação das nascente do Olho de Mira

Data	Tempo (h)	Precipitação diária (mm)			Precipitação diária média (mm)
		Crespos (16E/01UG)	Minde (16E/02G)	Serra de Santo António (16E/04U)	
07/12/1991 09:00	14.48	1	2	2	2
08/12/1991 09:00	38.48	7	5	6	6
09/12/1991 09:00	62.48	0	0	0	0
10/12/1991 09:00	86.48	0	0	0	0
11/12/1991 09:00	110.48	1	1	0	1
12/12/1991 09:00	134.48	0	0	0	0
13/12/1991 09:00	158.48	0	0	0	0
14/12/1991 09:00	182.48	13	15	17	15
15/12/1991 09:00	206.48	3	3	2	3
16/12/1991 09:00	230.48	7	3	4	5
17/12/1991 09:00	254.48	0	5	6	4
18/12/1991 09:00	278.48	0	0	0	0
19/12/1991 09:00	302.48	0	0	0	0
20/12/1991 09:00	326.48	0	0	0	0
21/12/1991 09:00	350.48	0	0	0	0
22/12/1991 09:00	374.48	0	0	0	0
23/12/1991 09:00	398.48	0	0	0	0
24/12/1991 09:00	422.48	0	0	0	0
25/12/1991 09:00	446.48	0	0	0	0
26/12/1991 09:00	470.48	0	0	0	0
27/12/1991 09:00	494.48	0	0	0	0
28/12/1991 09:00	518.48	0	0	0	0
29/12/1991 09:00	542.48	0	0	0	0
30/12/1991 09:00	566.48	0	0	0	0
31/12/1991 09:00	590.48	0	0	0	0
01/01/1992 09:00	614.48	0	0	0	0
02/01/1992 09:00	638.48	0	0	0	0
03/01/1992 09:00	662.48	0	0	0	0
04/01/1992 09:00	686.48	0	0	0	0
05/01/1992 09:00	710.48	0	0	0	0
06/01/1992 09:00	734.48	0	0	0	0
07/01/1992 09:00	758.48	0	0	0	0
08/01/1992 09:00	782.48	10	8	11	10
09/01/1992 09:00	806.48	40	26	22	29
10/01/1992 09:00	830.48	3	2	2	2

Data	Tempo (h)	Precipitação diária (mm)			Precipitação diária média (mm)
		Crespos (16E/01UG)	Minde (16E/02G)	Serra de Santo António (16E/04U)	
11/01/1992 09:00	854.48	0	0	0	0
12/01/1992 09:00	878.48	0	7	3	4
13/01/1992 09:00	902.48	0	0	0	0
14/01/1992 09:00	926.48	17	20	24	20
15/01/1992 09:00	950.48	2	1	6	3
16/01/1992 09:00	974.48	0	0	0	0
17/01/1992 09:00	998.48	0	0	0	0
18/01/1992 09:00	1022.48	0	0	0	0
19/01/1992 09:00	1046.48	0	0	0	0
20/01/1992 09:00	1070.48	0	0	0	0
21/01/1992 09:00	1094.48	0	0	0	0
22/01/1992 09:00	1118.48	0	0	0	0
23/01/1992 09:00	1142.48	0	0	0	0
24/01/1992 09:00	1166.48	0	0	0	0
25/01/1992 09:00	1190.48	0	0	0	0
26/01/1992 09:00	1214.48	0	0	0	0
27/01/1992 09:00	1238.48	0	0	0	0
28/01/1992 09:00	1262.48	0	0	0	0
29/01/1992 09:00	1286.48	1	0	0	0
30/01/1992 09:00	1310.48	0	0	0	0
31/01/1992 09:00	1334.48	0	0	0	0
01/02/1992 09:00	1358.48	0	0	0	0
02/02/1992 09:00	1382.48	0	0	0	0
03/02/1992 09:00	1406.48	0	0	0	0
04/02/1992 09:00	1430.48	0	0	0	0
05/02/1992 09:00	1454.48	0	0	0	0
06/02/1992 09:00	1478.48	0	0	0	0
07/02/1992 09:00	1502.48	0	0	0	0
08/02/1992 09:00	1526.48	0	0	0	0
09/02/1992 09:00	1550.48	0	0	0	0
10/02/1992 09:00	1574.48	0	0	0	0
11/02/1992 09:00	1598.48	0	0	0	0
12/02/1992 09:00	1622.48	3	9	15	9
13/02/1992 09:00	1646.48	24	28	24	26
14/02/1992 09:00	1670.48	0	0	0	0
15/02/1992 09:00	1694.48	0	0	0	0
16/02/1992 09:00	1718.48	0	0	0	0
17/02/1992 09:00	1742.48	0	0	0	0
18/02/1992 09:00	1766.48	9	9	8	9
19/02/1992 09:00	1790.48	0	0	0	0
20/02/1992 09:00	1814.48	6	10	5	7
21/02/1992 09:00	1838.48	0	0	0	0
22/02/1992 09:00	1862.48	0	0	0	0
23/02/1992 09:00	1886.48	0	0	0	0
24/02/1992 09:00	1910.48	0	0	0	0
25/02/1992 09:00	1934.48	0	0	0	0
26/02/1992 09:00	1958.48	0	0	0	0
27/02/1992 09:00	1982.48	0	0	0	0
28/02/1992 09:00	2006.48	0	0	0	0
29/02/1992 09:00	2030.48	0	0	0	0
01/03/1992 09:00	2054.48	0	0	0	0

Data	Tempo (h)	Precipitação diária (mm)			Precipitação diária média (mm)
		Crespos (16E/01UG)	Minde (16E/02G)	Serra de Santo António (16E/04U)	
02/03/1992 09:00	2078.48	0	0	0	0
03/03/1992 09:00	2102.48	0	0	0	0
04/03/1992 09:00	2126.48	0	0	0	0
05/03/1992 09:00	2150.48	0	0	0	0
06/03/1992 09:00	2174.48	0	0	0	0
07/03/1992 09:00	2198.48	0	0	0	0
08/03/1992 09:00	2222.48	0	0	0	0
09/03/1992 09:00	2246.48	0	0	0	0
10/03/1992 09:00	2270.48	0	0	0	0
11/03/1992 09:00	2294.48	0	0	0	0
12/03/1992 09:00	2318.48	0	0	0	0
13/03/1992 09:00	2342.48	0	0	0	0
14/03/1992 09:00	2366.48	0	0	0	0
15/03/1992 09:00	2390.48	0	0	0	0
16/03/1992 09:00	2414.48	0	0	0	0
17/03/1992 09:00	2438.48	0	0	0	0
18/03/1992 09:00	2462.48	0	0	0	0
19/03/1992 09:00	2486.48	0	0	0	0
20/03/1992 09:00	2510.48	0	0	0	0
21/03/1992 09:00	2534.48	0	0	0	0
22/03/1992 09:00	2558.48	0	0	0	0
23/03/1992 09:00	2582.48	0	0	0	0
24/03/1992 09:00	2606.48	0	2	5	2
25/03/1992 09:00	2630.48	0	0	0	0
26/03/1992 09:00	2654.48	0	0	0	0
27/03/1992 09:00	2678.48	7	2	4	4
28/03/1992 09:00	2702.48	0	0	0	0
29/03/1992 09:00	2725.48	3	0	0	1
30/03/1992 09:00	2749.48	0	2	5	2
31/03/1992 09:00	2773.48	39	28	30	32
01/04/1992 09:00	2797.48	18	11	9	13
02/04/1992 09:00	2821.48	24	34	42	33
03/04/1992 09:00	2845.48	33	29	23	28
04/04/1992 09:00	2869.48	13	16	22	17
05/04/1992 09:00	2893.48	0	0	0	0
06/04/1992 09:00	2917.48	0	0	14	5
07/04/1992 09:00	2941.48	17	13	2	10
08/04/1992 09:00	2965.48	0	1	0	0
09/04/1992 09:00	2989.48	0	0	0	0
10/04/1992 09:00	3013.48	0	0	0	0
11/04/1992 09:00	3037.48	0	0	0	0
12/04/1992 09:00	3061.48	0	0	0	0
13/04/1992 09:00	3085.48	0	0	0	0
14/04/1992 09:00	3109.48	0	0	0	0
15/04/1992 09:00	3133.48	0	0	0	0
16/04/1992 09:00	3157.48	0	0	0	0
17/04/1992 09:00	3181.48	0	0	0	0
18/04/1992 09:00	3205.48	0	0	0	0
19/04/1992 09:00	3229.48	0	0	0	0
20/04/1992 09:00	3253.48	0	0	0	0
21/04/1992 09:00	3277.48	0	0	0	0

Data	Tempo (h)	Precipitação diária (mm)			Precipitação diária média (mm)
		Crespos (16E/01UG)	Minde (16E/02G)	Serra de Santo António (16E/04U)	
22/04/1992 09:00	3301.48	0	0	0	0
23/04/1992 09:00	3325.48	0	0	0	0
24/04/1992 09:00	3349.48	0	0	0	0
25/04/1992 09:00	3373.48	0	0	0	0
26/04/1992 09:00	3397.48	0	0	0	0
27/04/1992 09:00	3421.48	0	0	0	0
28/04/1992 09:00	3445.48	0	0	0	0
29/04/1992 09:00	3469.48	0	0	0	0
30/04/1992 09:00	3493.48	0	0	0	0
01/05/1992 09:00	3517.48	0	0	0	0
02/05/1992 09:00	3541.48	0	0	0	0
03/05/1992 09:00	3565.48	0	0	0	0
04/05/1992 09:00	3589.48	0	0	0	0
05/05/1992 09:00	3613.48	0	0	0	0
06/05/1992 09:00	3637.48	0	0	0	0
07/05/1992 09:00	3661.48	0	0	0	0
08/05/1992 09:00	3685.48	0	0	0	0
09/05/1992 09:00	3709.48	0	0	0	0
10/05/1992 09:00	3733.48	0	0	0	0
11/05/1992 09:00	3757.48	0	0	0	0
12/05/1992 09:00	3781.48	0	0	0	0
13/05/1992 09:00	3805.48	0	0	0	0
14/05/1992 09:00	3829.48	0	0	0	0
15/05/1992 09:00	3853.48	0	0	0	0
16/05/1992 09:00	3877.48	0	0	0	0
17/05/1992 09:00	3901.48	0	0	0	0
18/05/1992 09:00	3925.48	0	0	0	0
19/05/1992 09:00	3949.48	0	0	0	0
20/05/1992 09:00	3973.48	0	0	0	0
21/05/1992 09:00	3997.48	0	0	0	0
22/05/1992 09:00	4021.48	0	0	0	0
23/05/1992 09:00	4045.48	1	4	3	2
24/05/1992 09:00	4069.48	4	1	1	2
25/05/1992 09:00	4093.48	0	0	0	0
26/05/1992 09:00	4117.48	0	0	0	0
27/05/1992 09:00	4141.48	7	4	6	5
28/05/1992 09:00	4165.48	7	4	8	6
29/05/1992 09:00	4189.48	20	29	27	25
30/05/1992 09:00	4213.48	0	0	0	0
31/05/1992 09:00	4237.48	0	0	0	0
01/06/1992 09:00	4261.48	18	16	16	16
02/06/1992 09:00	4285.48	0	0	0	0
03/06/1992 09:00	4309.48	0	0	0	0
04/06/1992 09:00	4333.48	0	0	0	0
05/06/1992 09:00	4357.48	0	0	1	0
06/06/1992 09:00	4381.48	0	0	0	0
07/06/1992 09:00	4405.48	0	0	0	0
08/06/1992 09:00	4429.48	6	3	5	5
09/06/1992 09:00	4453.48	4	2	3	3
10/06/1992 09:00	4477.48	2	2	2	2
11/06/1992 09:00	4501.48	0	0	0	0

Data	Tempo (h)	Precipitação diária (mm)			Precipitação diária média (mm)
		Crespos (16E/01UG)	Minde (16E/02G)	Serra de Santo António (16E/04U)	
12/06/1992 09:00	4525.48	13	10	10	11
13/06/1992 09:00	4549.48	0	0	0	0
14/06/1992 09:00	4573.48	15	20	8	14
15/06/1992 09:00	4597.48	13	5	17	11
16/06/1992 09:00	4621.48	0	0	0	0
17/06/1992 09:00	4645.48	0	0	0	0
18/06/1992 09:00	4669.48	0	0	0	0
19/06/1992 09:00	4693.48	0	0	0	0
20/06/1992 09:00	4717.48	0	0	0	0
21/06/1992 09:00	4741.48	0	0	0	0
22/06/1992 09:00	4765.48	0	0	0	0
23/06/1992 09:00	4789.48	0	0	0	0
24/06/1992 09:00	4813.48	0	0	0	0
25/06/1992 09:00	4837.48	0	0	0	0
26/06/1992 09:00	4861.48	0	0	0	0
27/06/1992 09:00	4885.48	0	0	0	0
28/06/1992 09:00	4909.48	0	0	0	0
29/06/1992 09:00	4933.48	0	0	0	0
30/06/1992 09:00	4957.48	0	2	3	2
01/07/1992 09:00	4981.48	2	0	0	1
02/07/1992 09:00	5005.48	0	0	0	0
03/07/1992 09:00	5029.48	0	0	0	0
04/07/1992 09:00	5053.48	0	0	0	0
05/07/1992 09:00	5077.48	0	0	0	0
06/07/1992 09:00	5101.48	0	0	0	0
07/07/1992 09:00	5125.48	0	0	0	0
08/07/1992 09:00	5149.48	0	0	0	0
09/07/1992 09:00	5173.48	0	0	0	0
10/07/1992 09:00	5197.48	0	0	0	0
11/07/1992 09:00	5221.48	0	0	0	0
12/07/1992 09:00	5245.48	0	0	0	0
13/07/1992 09:00	5269.48	0	0	0	0
14/07/1992 09:00	5293.48	0	0	0	0
15/07/1992 09:00	5317.48	0	0	0	0
16/07/1992 09:00	5341.48	0	0	0	0
17/07/1992 09:00	5365.48	0	0	0	0
18/07/1992 09:00	5389.48	0	0	0	0
19/07/1992 09:00	5413.48	0	0	0	0
20/07/1992 09:00	5437.48	0	0	0	0
21/07/1992 09:00	5461.48	0	0	0	0
22/07/1992 09:00	5485.48	0	0	0	0
23/07/1992 09:00	5509.48	0	0	0	0
24/07/1992 09:00	5533.48	0	0	0	0
25/07/1992 09:00	5557.48	0	0	0	0
26/07/1992 09:00	5581.48	0	0	0	0
27/07/1992 09:00	5605.48	0	0	0	0
28/07/1992 09:00	5629.48	0	0	0	0
29/07/1992 09:00	5653.48	0	0	0	0
30/07/1992 09:00	5677.48	0	1	0	0
31/07/1992 09:00	5701.48	0	0	0	0
01/08/1992 09:00	5725.48	0	0	0	0

Data	Tempo (h)	Precipitação diária (mm)			Precipitação diária média (mm)
		Crespos (16E/01UG)	Minde (16E/02G)	Serra de Santo António (16E/04U)	
02/08/1992 09:00	5749.48	0	0	0	0
03/08/1992 09:00	5773.48	0	0	0	0
04/08/1992 09:00	5797.48	0	0	0	0
05/08/1992 09:00	5821.48	0	0	0	0
06/08/1992 09:00	5845.48	0	0	0	0
07/08/1992 09:00	5869.48	0	0	0	0
08/08/1992 09:00	5893.48	0	0	0	0
09/08/1992 09:00	5917.48	0	0	0	0
10/08/1992 09:00	5941.48	0	0	0	0
11/08/1992 09:00	5965.48	0	0	0	0
12/08/1992 09:00	5989.48	0	0	0	0
13/08/1992 09:00	6013.48	0	0	0	0
14/08/1992 09:00	6037.48	0	0	0	0
15/08/1992 09:00	6061.48	0	0	0	0
16/08/1992 09:00	6085.48	0	0	0	0
17/08/1992 09:00	6109.48	0	0	0	0
18/08/1992 09:00	6133.48	0	0	0	0
19/08/1992 09:00	6157.48	0	0	0	0
20/08/1992 09:00	6181.48	0	0	0	0
21/08/1992 09:00	6205.48	0	0	0	0
22/08/1992 09:00	6229.48	0	0	0	0
23/08/1992 09:00	6253.48	0	0	0	0
24/08/1992 09:00	6277.48	0	0	0	0
25/08/1992 09:00	6301.48	0	0	0	0
26/08/1992 09:00	6325.48	0	0	0	0
27/08/1992 09:00	6349.48	0	0	0	0
28/08/1992 09:00	6373.48	9	8	6	7
29/08/1992 09:00	6397.48	9	8	12	10
30/08/1992 09:00	6421.48	0	0	0	0
31/08/1992 09:00	6445.48	10	7	8	8
01/09/1992 09:00	6469.48	2	0	0	1
02/09/1992 09:00	6493.48	0	0	0	0
03/09/1992 09:00	6517.48	0	0	0	0
04/09/1992 09:00	6541.48	0	0	0	0
05/09/1992 09:00	6565.48	0	0	0	0
06/09/1992 09:00	6589.48	0	0	0	0
07/09/1992 09:00	6613.48	0	0	0	0
08/09/1992 09:00	6637.48	0	0	0	0
09/09/1992 09:00	6661.48	0	0	0	0
10/09/1992 09:00	6685.48	0	0	0	0
11/09/1992 09:00	6709.48	0	0	0	0
12/09/1992 09:00	6733.48	0	0	0	0
13/09/1992 09:00	6757.48	0	0	0	0
14/09/1992 09:00	6781.48	0	0	0	0
15/09/1992 09:00	6805.48	0	0	0	0
16/09/1992 09:00	6829.48	0	0	0	0
17/09/1992 09:00	6853.48	0	0	0	0
18/09/1992 09:00	6877.48	0	0	0	0
19/09/1992 09:00	6901.48	0	0	0	0
20/09/1992 09:00	6925.48	0	0	0	0
21/09/1992 09:00	6949.48	0	0	0	0

Data	Tempo (h)	Precipitação diária (mm)			Precipitação diária média (mm)
		Crespos (16E/01UG)	Minde (16E/02G)	Serra de Santo António (16E/04U)	
22/09/1992 09:00	6973.48	4	0	0	1
23/09/1992 09:00	6997.48	0	0	0	0
24/09/1992 09:00	7021.48	0	0	0	0
25/09/1992 09:00	7045.48	0	0	0	0
26/09/1992 09:00	7069.48	14	31	28	24
27/09/1992 09:00	7093.48	16	6	9	10
28/09/1992 09:00	7117.48	0	0	0	0
29/09/1992 09:00	7141.48	0	5	4	3
30/09/1992 09:00	7165.48	0	0	0	0
01/10/1992 09:00	7189.48	0	0	0	0
02/10/1992 09:00	7213.48	0	0	0	0
03/10/1992 09:00	7237.48	0	0	0	0
04/10/1992 09:00	7261.48	0	0	0	0
05/10/1992 09:00	7285.48	0	0	0	0

Dados obtidos através do site <http://snirh.pt> em Agosto 2010.

Anexo 5 – Ensaios de Bombeamento

Dados do ensaio de bombeamento: 06 de agosto de 1992

Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)	Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)
0.00	0.00	84.17	0.00	10.00	599.92	85.45	1.28
0.08	4.71	84.66	0.49	10.16	609.33	85.46	1.29
0.27	16.47	84.74	0.57	10.43	625.79	85.47	1.30
0.39	23.53	84.80	0.63	10.65	639.13	85.48	1.31
0.98	58.82	84.88	0.71	10.86	651.67	85.49	1.32
1.29	77.64	84.93	0.76	10.97	657.95	85.49	1.33
1.50	90.18	84.96	0.79	11.12	667.36	85.50	1.33
1.90	113.71	85.01	0.84	11.34	680.69	85.51	1.34
2.54	152.14	85.08	0.91	11.78	706.57	85.52	1.35
2.78	167.04	85.11	0.94	11.88	712.84	85.52	1.35
3.18	190.56	85.15	0.98	12.36	741.86	85.55	1.38
3.89	233.69	85.21	1.04	12.94	776.36	85.58	1.41
4.56	273.69	85.25	1.08	13.17	790.48	85.59	1.42
4.88	292.51	85.27	1.10	13.45	806.95	85.61	1.44
5.18	310.55	85.29	1.12	13.62	817.14	85.62	1.45
5.93	356.03	85.32	1.15	14.08	844.59	85.63	1.46
6.73	403.87	85.35	1.18	14.34	860.27	85.64	1.47
7.32	439.16	85.38	1.21	15.03	901.84	85.66	1.49
8.33	499.54	85.41	1.25	15.68	941.05	85.69	1.52
9.02	541.10	85.44	1.27	16.23	973.98	85.71	1.54
9.21	552.86	85.45	1.28	16.74	1004.57	85.73	1.56
9.40	563.84	85.45	1.28	17.08	1024.96	85.74	1.57
9.76	585.80	85.45	1.28	17.19	1031.23	85.74	1.57

Dados do ensaio de bombeamento: 11 de agosto de 1992

Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)	Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)
0.00	0.00	84.57	0.00	3.72	223.50	85.61	1.04
0.07	3.92	84.86	0.29	4.20	251.73	85.64	1.07
0.09	5.49	85.10	0.53	4.43	265.85	85.66	1.08
0.50	29.80	85.18	0.61	5.03	301.92	85.70	1.13
0.86	51.76	85.24	0.67	5.49	329.37	85.74	1.17
1.48	88.61	85.34	0.77	5.80	348.19	85.76	1.19
1.83	109.79	85.39	0.82	6.54	392.10	85.81	1.24
2.30	138.02	85.45	0.88	7.07	424.25	85.85	1.27
2.94	176.45	85.54	0.97	7.36	441.51	85.86	1.29
3.22	192.92	85.57	1.00				

Dados do ensaio de bombeamento: 14 de agosto de 1992

Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)	Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)
0.00	0.00	84.68	0.00	2.60	156.06	85.55	0.87
0.14	8.63	85.03	0.36	2.97	178.01	85.59	0.92
0.18	10.98	85.13	0.45	3.20	192.13	85.62	0.94
0.42	25.09	85.21	0.54	3.54	212.52	85.67	0.99
0.63	37.64	85.28	0.60	3.89	233.69	85.71	1.03
0.88	52.54	85.33	0.65	4.22	253.30	85.75	1.07
0.98	58.81	85.35	0.68	4.67	279.96	85.79	1.12
1.31	78.42	85.40	0.72	5.11	306.62	85.83	1.15
1.62	97.24	85.43	0.75	5.44	326.23	85.86	1.18
2.05	123.12	85.49	0.81	5.59	335.64	85.87	1.19

Dados do ensaio de bombeamento: 16 de agosto de 1992

Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)	Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)
0.00	0.00	84.75	0.00	2.71	162.33	85.70	0.95
0.17	10.19	85.13	0.38	3.12	187.43	85.76	1.01
0.26	15.68	85.32	0.57	3.83	229.77	85.84	1.09
0.77	46.27	85.42	0.67	4.38	262.71	85.90	1.15
0.99	59.60	85.45	0.70	4.85	290.94	85.96	1.21
1.67	100.38	85.55	0.80	5.02	301.13	85.97	1.22
2.09	125.47	85.61	0.86				

Dados do ensaio de bombeamento: 19 de agosto de 1992

Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)	Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)
0.00	0.00	85.05	0.00	3.39	203.11	86.09	1.04
0.03	1.57	85.50	0.45	3.72	223.50	86.13	1.08
0.17	10.20	85.63	0.58	4.14	248.59	86.17	1.11
0.33	19.61	85.66	0.60	4.39	263.49	86.19	1.14
0.72	43.13	85.73	0.68	5.08	305.06	86.25	1.20
1.18	70.58	85.81	0.75	5.65	338.78	86.30	1.24
1.41	84.70	85.84	0.79	5.84	350.54	86.31	1.25
2.08	124.69	85.93	0.88	6.27	376.42	86.33	1.28
2.48	149.00	85.99	0.93	6.47	388.18	86.34	1.29
2.72	163.12	86.02	0.97				

Dados do ensaio de bombeamento: 20 de agosto de 1992

Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)	Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)
0.00	0.00	85.11	0.00	3.59	215.66	86.16	1.04
0.01	0.79	85.53	0.41	3.92	235.26	86.20	1.08
0.21	12.55	85.67	0.56	4.30	258.00	86.24	1.13
0.29	17.25	85.69	0.58	5.01	300.35	86.30	1.19
0.73	43.92	85.78	0.67	5.37	322.31	86.33	1.22
0.94	56.46	85.82	0.71	5.65	338.78	86.36	1.24
1.32	79.21	85.88	0.76	6.23	374.07	86.39	1.28
1.84	110.57	85.95	0.84	6.35	381.12	86.40	1.28
2.29	137.24	86.01	0.90	6.60	396.02	86.40	1.28
3.06	183.50	86.10	0.98	6.86	411.71	86.40	1.28

Dados do ensaio de bombeamento: 22 de agosto de 1992

Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)	Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)
0.00	0.00	85.22	0.00	2.29	137.24	86.12	0.90
0.17	10.20	85.53	0.31	2.74	164.68	86.18	0.95
0.27	16.47	85.69	0.47	3.42	205.46	86.26	1.04
0.48	29.02	85.80	0.57	4.16	249.38	86.34	1.11
0.61	36.86	85.84	0.62	4.56	273.69	86.37	1.15
1.19	71.36	85.95	0.73	4.91	294.86	86.40	1.18
1.66	99.59	86.03	0.80				

Dados do ensaio de bombeamento: 24 de agosto de 1992

Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)		Tempo (horas)	Tempo (min)	Nível água (m)	Rebaixamento (m)
0.00	0.00	85.16	0.00		3.68	220.62	86.30	1.13
0.14	8.36	85.63	0.47		4.06	243.62	86.34	1.18
0.17	10.46	85.68	0.52		4.43	265.58	86.39	1.22
0.78	47.05	85.83	0.67		4.53	271.86	86.40	1.24
1.15	69.01	85.91	0.74		5.32	318.91	86.46	1.30
1.92	115.02	86.04	0.87		6.05	362.82	86.52	1.36
2.42	145.34	86.13	0.96		6.43	385.83	86.56	1.39
2.89	173.57	86.21	1.04					